

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS – UNIS – MG

ENGENHARIA CIVIL

PHELIPE CURI VILELA CARVALHO

**ESTUDO DO FATOR DE SEGURANÇA DE BARRAGEM DE SOLO NO
MUNICÍPIO DE ILICÍNEA - MG**

Varginha

2019

PHELIPE CURI VILELA CARVALHO

**ESTUDO DO FATOR DE SEGURANÇA DE BARRAGEM DE SOLO NO
MUNICÍPIO DE ILICÍNEA – MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário do Sul de Minas UNIS-MG, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil, sob orientação da Professora Esp. Luane Carolina Mendes.

Varginha

2019

PHELIPE CURI VILELA CARVALHO

**ESTUDO DO FATOR DE SEGURANÇA DE BARRAGEM DE SOLO NO
MUNICÍPIO DE ILICÍNEA – MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário do Sul de Minas UNIS-MG, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em / /

Professora Esp. Luane Carolina Mendes

Professora Esp. Luana Ferreira Mendes

Professor Me. Elker Lucas Garroni

OBS.:

Dedico este trabalho a minha saudosa avó
Marta Curi, por todo o amor, apoio e
conselhos dados e por ter compartilhado esse
sonho comigo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela minha existência. A minha família por ser meu alicerce. A Professora Esp. Luane Carolina Mendes pelas orientações e conselhos. Ao Professor Me. Armando Belato Pereira pelos ensinamentos de mecânica dos solos e instruções de software que embasaram este trabalho. A Professora Esp. Geisla Aparecida Maia Gomes pelos conselhos que me ajudaram durante a minha formação. Ao Engenheiro civil Phelipe Gomes Silva por me conceder estágio, pelas orientações e apoio que muito contribuiu para este trabalho e minha trajetória acadêmica. Aos amigos que me apoiaram e a todos que direto ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“Os erros do passado não podem ser repetidos, mas devem servir como reflexão para a construção de um futuro melhor.”

Elisa Masselli

RESUMO

A análise de estabilidade de uma barragem de solo consiste no cálculo do fator de segurança devido ao risco de ruptura ao escorregamento. Para isso, foi realizada uma pesquisa bibliográfica da literatura inerente, além de, apresentar os principais conceitos de barragem, inclusive ter utilizado três métodos comuns das fatias para determinar o fator de segurança do maciço. São apresentados os tipos de barragens existentes, assim como, as fases de projeto, investigações e ensaios laboratoriais, não realizados neste trabalho. Para efeito de cálculo, alguns dos parâmetros geotécnicos foram estabelecidos por meio de correlações, uma vez que, durante a construção da barragem, não foram realizados alguns ensaios significativos para o cálculo do fator de segurança. A barragem estudada está localizada em uma propriedade rural, no Município de Ilícinea – MG, e sua finalidade é represar água pra uso na irrigação. Com o embasamento bibliográfico e com o auxílio de softwares, foi possível determinar o fator de segurança e concluir que os três métodos utilizados, apresentaram resultados satisfatórios, ao atenderem os valores mínimos estabelecidos por norma, com base nos parâmetros geotécnicos analisados. Outro estudo realizado neste trabalho, foi o comportamento do fator de segurança devido a variação do ângulo de atrito, coesão e peso específico da barragem, assim foi possível concluir que esses parâmetros são de grande importância para o cálculo do fator de segurança, sendo esses, parâmetros fundamentais, cujo engenheiro deve conhecer para determinar o solo que será utilizado na construção da barragem.

Palavras chave: Barragem. Estabilidade de talude. Fator de segurança.

ABSTRACT

The stability analysis of a soil dam consists of the calculation of the safety factor due to the risk of slip failure. For this, a bibliographic research of the inherent literature was performed, besides presenting the main dam concepts, including having used three common methods of the slices to determine the safety factor of the massif. Existing types of dams are presented, as well as the design phases, investigations and laboratory tests not carried out in this work. For the purpose of calculation, some of the geotechnical parameters were established through correlations, since during the construction of the dam, no significant tests were performed to calculate the safety factor. The dam studied is located in a rural property in the city of Ilicínea - MG, and its purpose is to dam water for use in irrigation. With the bibliographic basis and with the aid of software, it was possible to determine the safety factor and conclude that the three methods used, presented satisfactory results, meeting the minimum values established by norm, based on the analyzed geotechnical parameters. Another study carried out in this work was the safety factor behavior due to the variation of the friction angle, cohesion and specific dam weight, so it was possible to conclude that these parameters are of great importance for the safety factor calculation. fundamental parameters, whose engineer must know to determine the soil that will be used in the construction of the dam.

Keywords: Dam. Stability of slope. Safety Factor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Barragem do tipo abóbada da usina hidrelétrica de Funil em Resende - RJ	23
Figura 02 – Barragem de concreto por gravidade da usina hidrelétrica de Itumbiara - GO....	24
Figura 03 – Barragem de concreto com contrafortes e por gravidade aliviada da usina hidrelétrica de Itaipu em Foz do Iguaçu - PR	24
Figura 04 – Ilustração da parte da barragem de concreto por gravidade aliviada da usina hidrelétrica de Itaipu	25
Figura 05 – Barragem com contrafortes de concreto da represa de Roselend localizada em Beaufort na França.....	25
Figura 06 – Barragem de enrocamento com núcleo impermeável da usina hidrelétrica de Furnas em Minas Gerais	26
Figura 07 – Barragem de enrocamento com face impermeável de concreto da usina hidrelétrica Barra Grande em Santa Catarina	26
Figura 08 – Barragem de solo em Congonhas - MG	27
Figura 09 – Fluxo pela barragem de solo construída sobre uma base impermeável	34
Figura 10 – Taludes de corte e aterro.....	36
Figura 11 – Demonstração do método das fatias	37
Figura 12 – Forças atuantes na n-ésima fatia.....	38
Figura 13 – Forças atuantes na n-ésima fatia pelo método de Morgenstern-Price	43
Figura 14 – Elemento na interface entre duas fatias	45
Figura 15 – Tensões efetivas atuantes em um elemento.....	46
Figura 16 – Ilustração do cilindro de PROCTOR	57
Figura 17 – Aparelho de Casagrande.....	59
Figura 18 – Equipamento de cravação.....	61
Figura 19 – Localização da barragem usada como estudo de caso.....	63
Figura 20 – Linha piezométrica 01	68
Figura 21 – Linha piezométrica 02	69
Figura 22 – Linha piezométrica 03	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Faixas de ângulos de atrito, em graus, para solos	19
Tabela 02 – Valores para coesão do solo	19
Tabela 03 – Peso específico de solos argilosos	20
Tabela 04 – Peso específico de solos arenosos	20
Tabela 05 – Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração	47
Tabela 06 – Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas	48
Tabela 07 – Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais	49
Tabela 08 – Peneiras para ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação	52
Tabela 09 – Energia de compactação	57
Tabela 10 – Parâmetros geotécnicos para cálculo do fator de segurança	67
Tabela 11 – Parâmetros geotécnicos para cálculo do fator de segurança – primeira combinação	67
Tabela 12 – Parâmetros geotécnicos para cálculo do fator de segurança – segunda combinação	67
Tabela 13 – Parâmetros geotécnicos para cálculo do fator de segurança – terceira combinação	67
Tabela 14 – Parâmetros geotécnicos para cálculo do fator de segurança – quarta combinação	68
Tabela 15 – Parâmetros geotécnicos para cálculo do fator de segurança – quinta combinação	68
Tabela 16 – Parâmetros geotécnicos para cálculo do fator de segurança – sexta combinação	68

LISTA DE SÍMBOLOS

φ' – Ângulo de atrito efetivo

φ'_p – Ângulo de atrito de pico

φ'_r – Ângulo de atrito residual

c' – Coesão

N_{spt} – Índice de resistência à penetração

γ – Peso específico

W_s – Massa do solo

w – Teor de umidade

V – Volume total da amostra

γ_d – Peso específico seco

W_n – Peso da fatia

N_r – Componente normal

T_r – Componente tangencial

P_n – Força normal atuante na fatia

P_{n+1} – Força normal atuante na fatia

T_n – Força cisalhante atuante na fatia

T_{n+1} – Força cisalhante atuante na fatia

α_n – Ângulo de inclinação da base da fatia com a horizontal

r – Raio do círculo da superfície de ruptura

O – Ponto central do círculo da superfície de ruptura

FS – Fator de segurança

τ_f – Tensão cisalhante

τ_{mob} – Tensão cisalhante mobilizada

σ' – Tensão normal

l – Largura da fatia

L_a – Somatório da largura de todas as fatias

N – Força normal

U – Força promovida pela água

u – Poropresão

dT – Tensão efetiva

D_{10} – Diâmetro efetivo

C_u – Coeficiente uniforme

D_{60} – Diâmetro que corresponde a 60% de grãos finos

C_c – Coeficiente de curvatura

D_{30} – Diâmetro que corresponde a 30% da massa passante

S_0 – Coeficiente de segregação

D_{25} – Diâmetro que corresponde a 25% da massa passante

D_{75} – Diâmetro que corresponde a 75% da massa passante

LL – Limite de liquidez

LP – Limite de plasticidade

M_1 – Massa do solo úmido

M_2 – Massa do solo seco

M_3 – Massa do recipiente

ρ_{nat} – Massa específica aparente natural do solo

M_t – Massa do cilindro com a amostra úmida

M_c – Massa do cilindro

V_c – Volume interno do cilindro

ρ_d – Massa específica aparente seca do solo

FS_1 – Fator de segurança arbitrado igual ao fator de segurança de Fellenius

FS_2 – Fator de segurança arbitrado majorado em 10% em relação ao fator de segurança de Fellenius

FS_3 – Fator de segurança arbitrado majorado em 25% em relação ao fator de segurança de Fellenius

FS_f – Fator de segurança de Fellenius

IP – Índice de plasticidade

$\gamma_d \text{ máx.}$ – Peso específico seco máximo

ω – Umidade ótima

GC – Grau de compactação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo geral.....	16
2.2 Objetivos específicos	16
3 SOLOS	17
3.1 Classificação do solo pelo sistema unificado.....	17
3.2 Parâmetros geotécnicos	18
3.2.1 Ângulo de atrito	18
3.2.2 Coesão.....	19
3.2.3 Peso específico.....	20
4 BARRAGEM.....	22
4.1 Tipos de barragens.....	23
4.1.1 Abóbadas.....	23
4.1.2 Concreto.....	23
4.1.3 Contraforte de concreto.....	25
4.1.4 Enrocamento com face de concreto	26
4.1.5 Solo	27
5 PROJETO DE BARRAGEM	28
5.1 Etapas da durabilidade de uma barragem	28
5.2 Critérios de projeto.....	28
5.3 Fases de projeto.....	29
5.3.1 Inventário ou plano diretor.....	29
5.3.2 Viabilidade.....	29
5.3.3 Projeto básico.....	30
5.3.4 Projeto executivo	30
6 ASPECTOS GEOLÓGICOS.....	31
6.1 Erosão.....	31
6.1.1 Pluviosidade.....	31
6.1.2 Declividade	31
6.1.3 Natureza do solo	32
6.1.4 Cobertura vegetal	32
6.1.5 Atividade antrópica.....	32
6.2 Assoreamento	32
6.3 Medidas preventivas contra erosão e assoreamento.....	33
6.4 Instabilidade de encostas.....	33
6.5 Percolação.....	34
6.5.1 Percolação em barragem de solo.....	34
7 ESTABILIDADE DE TALUDES	36
7.1 Método comum de fatias	37
7.1.1 Fellenius.....	41
7.1.2 Bishop simplificado	42
7.1.3 Morgenster-Price.....	42
8 INVESTIGAÇÕES PARA OBRAS DE BARRAGENS.....	50

8.1 Investigações geofísicas.....	50
8.1.1 Georadar.....	50
8.1.2 Sísmica de refração	50
8.1.3 Eletroresistividade.....	50
8.2 Investigações mecânicas	51
8.2.1 Sondagem a trado.....	51
8.2.2 Sondagem à percussão	51
8.2.3 Sondagem Rotativa	51
9 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL DE SOLOS	52
9.1 Ensaio de granulometria	52
9.1.1 Ensaio de peneiramento	52
9.1.2 Ensaio de sedimentação	53
9.1.3 Curva de distribuição granulométrica	54
9.2 Ensaio de compactação.....	55
9.2.1 Proctor normal	56
9.3 Ensaio de limite de liquidez e limite de plasticidade.....	58
9.3.1 Limite de liquidez	58
9.3.2 Limite de plasticidade	59
9.4 Ensaio com cilindro de cravação	60
10 MATERIAIS E MÉTODOS	63
10.1 Estudo de caso	63
10.2 Parâmetros geotécnicos	65
10.3 Fatores de segurança	69
11 CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA.....	71
12 DISCUSSÃO E RESULTADOS	75
12.1 Resultados.....	75
13 CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
REFERÊNCIAS.....	98
APÊNDICE A – Medidas da barragem para aplicação do método das fatias	101
ANEXO A – Seção transversal e longitudinal da barragem do estudo de caso	105
ANEXO B – Fatores de segurança por meio do GeoStudio.....	107

1 INTRODUÇÃO

As barragens estão presentes no dia a dia da população, sejam elas para usinas hidrelétricas, irrigações, ou até mesmo para rejeitos de minérios. Por isso a importância de averiguar a estabilidade dessas barragens, pois, uma vez que se rompem, causam grandes prejuízos.

A análise de estabilidade global da estrutura consiste em um diagnóstico rápido e simples, onde, basicamente, é estudada a probabilidade de ruptura devido ao fator de segurança. Para isso, existem vários métodos de cálculos que apresentam o fator de segurança dos taludes, inclusive, com o auxílio de softwares, é possível compará-los independentemente da sua complexidade.

O fator de segurança de uma barragem de solo, no que diz respeito à análise de estabilidade global, está diretamente relacionado à sua geometria. Uma vez que o peso próprio da barragem contribui para sua estabilidade ao gerar um momento de resistência contra o momento de tombamento, gerado pelo empuxo do material represado.

Para realizar uma análise de estabilidade de uma barragem de solo, é preciso conhecer os parâmetros geométricos do solo utilizado na estrutura da barragem e, também, deve-se estabelecer qual método será trabalhado. Pode-se utilizar mais de um método, para realizar uma comparação e verificar a coerência dos resultados.

O presente trabalho buscou-se realizar uma análise de estabilidade de uma barragem de solo construída em uma propriedade rural no Município de Ilícinea - MG. Para isso, utilizaram-se o referencial teórico que abrange os conceitos de solo e apresentam importantes parâmetros geotécnicos, assim como, os tipos de barragens existentes, as fases de projeto, investigações, ensaios laboratoriais e alguns dos métodos de análise de estabilidade de taludes.

Com relação aos fatores de segurança calculados, foram utilizados softwares como Excel e GeoStudio, para averiguar a segurança de todas as combinações de parâmetros geotécnicos, apresentados neste trabalho.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Realizar um estudo analítico de uma barragem de solo, embasado bibliograficamente na literatura inerente juntamente com softwares, no intuito de determinar o fator de segurança de um estudo de caso.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar uma pesquisa bibliográfica sobre o tema proposto;
- Apresentar os principais conceitos para o entendimento de barragens;
- Explicar os diversos tipos de barragens existentes;
- Demonstrar alguns dos possíveis métodos de cálculo para obter o fator de segurança;
- Empregar a teoria pesquisada, no estudo de caso;
- Verificar se a barragem do estudo de caso atende o fator de segurança determinado por norma.

3 SOLOS

Segundo Oliveira (1998) o solo pode ser interpretado por diversas maneiras, pois cada área científica tem um ponto de vista diferente. Por exemplo: na agronomia, solo é considerado como a camada arável para o plantio; para engenharia civil, o solo é um material escavável, onde são assentados os elementos das fundações das edificações e que ao contato com a água pode perder consideravelmente a sua resistência; já na pedologia (ciência que estuda o solo), de acordo com Craig (2013), o solo é a camada viva que recobre a superfície da Terra, formado pela decomposição de rochas por ações do intemperismo, com espaço vazio ocupado por água e ar entre as partículas.

White (2009) explica que o solo pode ser formado por depósitos superficiais não consolidados, oriundos da denudação no passado e erosão da rocha consolidada, onde são transportados pela água, vento, gelo ou até mesmo pela gravidade.

É definido como solo, “corpos dinâmicos naturais que possuem características decorrentes das influências combinadas de clima e atividades bióticas, modificadas pela topografia, que atua sobre os materiais originários, ao longo de certo período de tempo” (BUCKMAN e BRADY, 1960, apud OLIVEIRA; BRITO, 1998, p. 88).

Segundo Pinto (2006), os solos são constituídos por um conjunto de partículas com água e ar nos espaços intermediários, ou seja, as partículas podem se deslocar entre si. Assim como nos cristais de uma rocha ou nos agregados de um concreto e, pode ocorrer, em um grau extremamente mais baixo, uma pequena cimentação das partículas do solo.

3.1 Classificação do solo pelo sistema unificado

De acordo com (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1991, apud DAS; SOBHAN, 2014, p.101) a forma original desse sistema foi proposta por Casagrande em 1942, usada nos trabalhos de construção de aeródromo sob o Corpo de Engenheiros do Exército durante a Segunda Guerra Mundial. Em 1952 este sistema foi revisado com a cooperação do Escritório de Recuperação de Solos. Agora, é amplamente utilizado pelos engenheiros.

Das (2014) explica que esse sistema classifica os solos em duas categorias: a primeira categoria é dos prefixos G para pedregulho ou solo com pedregulho e S para areia ou solo arenoso. Essa é a categoria dos solos granulares grossos que têm a natureza de pedregulhos e areia com menos de 50% passante pela peneira nº 200. A segunda categoria é dos prefixos M

para silte inorgânico, C para argila inorgânica, O para siltes e argilas, ambos orgânicos, e prefixo Pt para turfa, humo e outros solos altamente orgânicos. Essa é a categoria dos solos granulares finos com pelo menos 50% passante na peneira n° 200.

Das (2014) diz ainda que algumas informações devam ser conhecidas para a classificação apropriada de acordo com esse sistema, são elas:

- a. Porcentagem de pedregulhos: material retido na peneira n° 4 (4.75mm);
- b. Porcentagem de areia: material retido na peneira n° 200 (0.075mm);
- c. Porcentagem de silte e argila: material passante na peneira n° 200 (0.075mm);
- d. Coeficiente de uniformidade (Cu) e coeficiente de curvatura (Cc);
- e. Limite de liquidez e índice de plasticidade da fração do solo passante na peneira n°40.

3.2 Parâmetros geotécnicos

Segundo Magalhães (2015), os parâmetros geotécnicos baseiam-se no método de cálculo e podem ser definidos diretamente por ensaios de laboratório ou indiretamente por meio de correlações. Esses parâmetros, de acordo com Magalhães (2015), são classificados em três grupos: resistência, deformabilidade e permeabilidade. Basicamente, esses parâmetros estão em função ao método de cálculo adotado e das condições de drenagem (tensão efetiva ou total).

De acordo com Das (2014) para a análise de estabilidade de um talude, além dos pesos específicos, natural e saturado, apenas os parâmetros de resistência são necessários.

3.2.1 Ângulo de atrito

Segundo Pinto (2006), o ângulo de atrito é entendido como o ângulo máximo que a força transmitida pelo corpo à superfície faz com a normal do plano de contato sem que ocorra deslizamento, ou seja, é a medida do atrito médio entre os grãos do solo.

Budhu (2017) fornece os valores típicos de ângulos de atrito, como pode ser visto na tabela 01.

Tabela 01: faixas de ângulos de atrito, em graus, para solos

Tipo de Solo	φ'	φ'_p	φ'_r
Pedregulho	30-35	30-50	-
Mistura de pedregulho e areia com solos de granulometria fina	28-33	30-40	-
Areia	27-37*	32-50	-
Silte ou areia siltosa	24-32	27-35	-
Argilas	15-30	20-30	5-15

*Maiores valores (32° a 37°) nas faixas são para areias com quantidades significativas de feldspato. Valores menores (27° a 32°) nas faixas são para areias quartzosas.

Fonte: adaptado BUDHU, 2017

3.2.2 Coesão

Segundo a NBR 6.502/1995, coesão é a “resistência aos esforços de cisalhamento que depende fundamentalmente da natureza e composição da rocha, ou seja, independe das tensões aplicadas.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995, p. 6)

Quando não é definido por laboratório, segundo (GODOY, 1996, apud, CINTRA, 2011), é possível obter o valor da coesão por meio de uma correlação com o índice de resistência à penetração N_{spt} .

(Equação 01)

$$c' = 10 \cdot N_{spt}$$

c' = coesão expressa em (kPa);

N_{spt} = índice de resistência à penetração.

Bowles (1997), apresenta alguns valores para a coesão em relação à consistência da argila, como pode ser visto na tabela 02.

Tabela 02: valores para coesão do solo

Consistência da argila	Coesão (kN/m²)
Muito mole	< 12,5
Mole	12,5 - 25
Média	25 - 50
Rija	50 - 100
Muito rija	100- 200
Dura	> 200

Fonte: adaptado BOWLES, 1997

3.2.3 Peso específico

Cintra (2011) explica que se não houver ensaios de laboratório, é possível, a partir dos valores aproximados da tabela 03 e 04, adotar o peso específico do solo em função da consistência da argila e da compactidade da areia, respectivamente. Os estados de consistência de solos finos e de compactidade de solos grossos são dados em função do índice de resistência à penetração (Nspt), de acordo com a NBR 6.484/2001 da ABNT.

Tabela 03: peso específico de solos argilosos

Nspt	Consistência	Peso específico (kN/m³)
≤ 2	Muito Mole	13
3 - 5	Mole	15
6 - 10	Média	17
11 - 19	Rija	19
≥ 20	Dura	21

Fonte: adaptado GODOY, 1972 (*apud* CINTRA, 2011)

Tabela 04: peso específico de solos arenosos

Nspt	Compacidade	Peso específico (kN/m³)		
		Areia seca	Úmida	Saturada
< 5	Fofa			
5 - 8	Pouco Compacta	16	18	19
9 - 18	Medianamente Compacta	17	19	20
19 - 40	Compacta	18	20	21
> 40	Muito Compacta			

Fonte: adaptado GODOY, 1972 (*apud* CINTRA, 2011)

Pereira (2019), explica que algumas correlações podem ser feitas para obter o peso específico por meio das fórmulas a seguir.

(Equação 02)

$$\gamma = \frac{W_s \cdot (1 + w)}{V}$$

Onde:

γ = peso específico, expresso em kN/m³;

W_s = massa do solo, expresso em kN;

w = teor de umidade;

V = volume total da amostra, expresso em m^3 .

A fórmula do peso específico seco (γ_d) é apresentada a seguir.

(Equação 03)

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

Ou seja, ao substituir a equação do peso específico seco (γ_d) na equação do peso específico (γ), têm-se:

(Equação 04)

$$\gamma = \gamma_d \cdot (1 + w)$$

Para efeito de correlações de parâmetros, Pereira (2019) apresenta o quadro a seguir.

Quadro 01: parâmetros médios do solo

Tipo de solo	Faixa de SPT	Módulo de Elasticidade (t/m^2)	Peso específico (γ)		Ângulo de atrito efetivo (ϕ)	Coesão efetiva (tf/m^2)
			Natural (t/m^3)	Saturado (t/m^3)		
Argila siltosa pouco arenosa	0-2	100	1,7	1,8	20°	0,75
	3-5	100-250	1,8	1,9	23°	1,5
	6-10	250-500	1,9	1,9	24°	2,0
	11-19	500-1000	1,9	1,9	24°	3,0
	20-30	3000-10000	2,0	2,0	25°	4,0
	≥ 30	10000-15000	2,0	2,0	25°	5,0

Fonte: adaptado JOPPERT, 2007 (apud PEREIRA, 2019)

4 BARRAGEM

As barragens são estruturas que funcionam como reservatórios para contenção de água ou acumulação de rejeitos de minério. Segundo Mello (2011), as primeiras barragens de rejeitos instaladas no Brasil foram introduzidas, aproximadamente, há 300 anos.

De acordo com Mello (2011), o progresso das tecnologias de implantação de barragens, ocorreu em meio às catástrofes das rupturas dos diques, devido às exigências da sociedade para acabar com os desastres. Assim sendo, segundo Mello (2011), na década de 50 já eram compreendidos e aplicados, os princípios fundamentais de geotecnia. Outro fator que contribuiu nos estudos de ruptura das barragens, segundo Mello (2011), foi um terremoto que aconteceu em 1965 no Chile, onde várias barragens entraram em colapso após o abalo sísmico.

Conforme Mello (2011), antes do século XV, os rejeitos de minério eram lançados próximos aos rios e cursos d'água, pois os impactos ambientais causados eram desprezados. Mas, a partir da década de 30, as indústrias investiram na construção das primeiras barragens no intuito de aliviar os impactos ambientais. Geralmente essas barragens eram projetadas transversalmente aos cursos d'água, com considerações limitadas apenas para inundações, na maioria das vezes, não tinham engenheiros ou parâmetros técnicos envolvidos nas fases de construção e de operação. Ainda na década de 30, a construção das barragens era realizada a partir de um dique preenchido com rejeitos e incrementado por pequenas bermas, pois não eram acessíveis os equipamentos para movimentação de terras. De acordo com Mello (2011), esse tipo de construção continua sendo utilizados, porém mecanizado. Foi a partir da década de 40, que tornou possível a construção de barragens de contenção de rejeitos, similar às barragens convencionais.

Segundo Mello (2011) o desenvolvimento da tecnologia para construção de barragens de contenção de rejeitos ocorreu de modo empírico, de acordo com a tecnologia disponível em cada época. Assim sendo, o Brasil teve por muitos anos aplicada a prática de utilizar os equipamentos de lavra para construção de barragens, geralmente com orientação técnica de engenheiros de minas especializados nas técnicas de lavra. Era construído um aterro com o material estéril removido da mina, transversalmente aos vales, para criar volumes de retenção dos rejeitos do beneficiamento do minério.

4.1 Tipos de barragens

De acordo com o Instituto Tecnológico Vale - ITV existem vários tipos de barragens, que variam de acordo com a finalidade e conformação do terreno.

4.1.1 Abóbadas

Segundo Costa (2012) normalmente são construídas em vales mais estreitos e por ter formato curvo, parte das pressões hidráulicas sobre o maciço é transferida às ombreiras. Características dessa barragem são: a necessidade de grandes escavações para atingir a rocha sã; os esforços sobre a fundação são maiores; a geologia é fator muito importante para a estabilidade. Pode ser visto um exemplo desse tipo na figura 01.

Figura 01: barragem do tipo abóbada da usina hidrelétrica de Funil em Resende - RJ



Fonte: FURNAS

4.1.2 Concreto

Costa (2012) explica que normalmente esse tipo de barragem é construído em locais onde há restrição de espaço ou dificuldade para terraplenagem. Podem ser construídas por gravidade, como é visto na figura 02, onde a estrutura é um maciço de concreto com pouca armação, e gravidade aliviada, apresentada na figura 03 e 04, onde a estrutura é vazada por isso torna-se mais leve, porém, esse tipo de barragem construída em gravidade aliviada, sofre esforços de tração e isso faz com que o consumo de aço aumente.

Figura 02: barragem de concreto por gravidade da usina hidrelétrica de Itumbiara – GO



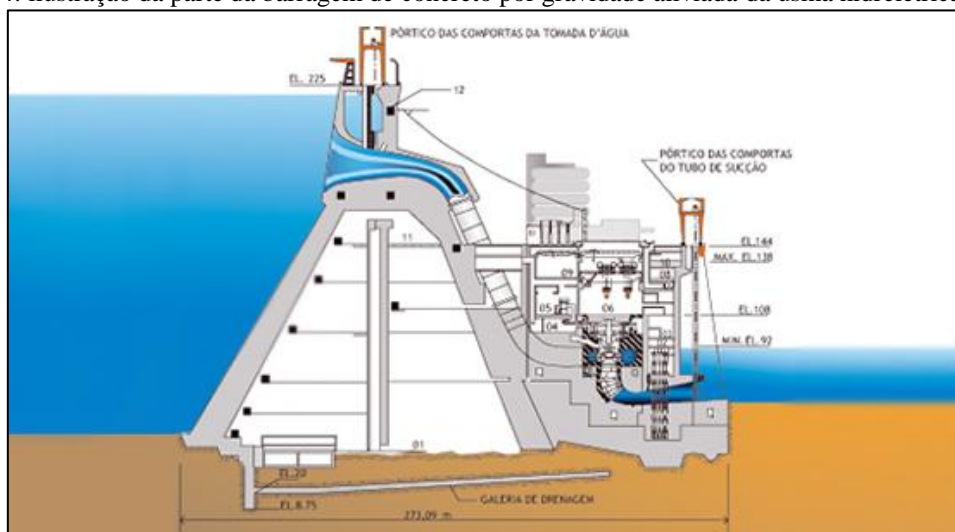
Fonte: FURNAS

Figura 03: barragem de concreto com contrafortes e por gravidade aliviada da usina hidrelétrica de Itaipu em Foz do Iguaçu – PR



Fonte: ITAIPU BINACIONAL, 2016

Figura 04: ilustração da parte da barragem de concreto por gravidade aliviada da usina hidrelétrica de Itaipu

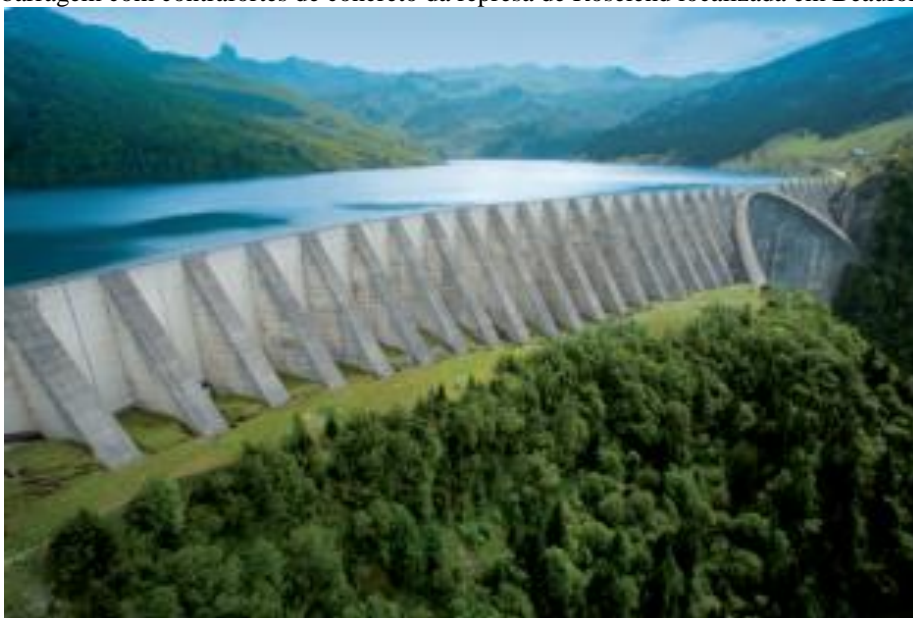


Fonte: ITAIPU BINACIONAL, 2016

4.1.3 Contraforte de concreto

Conforme Costa (2012) das três barragens de concreto é a que apresenta o menor volume de concreto. Ela é formada por uma laje impermeável de concreto, apoiada por contrafortes. Possui uma pequena área da base onde a pressão é reduzida, porém, necessita de um maior tratamento das fundações. Assemelha-se a barragem de gravidade aliviada, porém mais leve. Exemplos desse tipo apresentados nas figuras 03 e 05.

Figura 05: barragem com contrafortes de concreto da represa de Roselend localizada em Beaufort na França

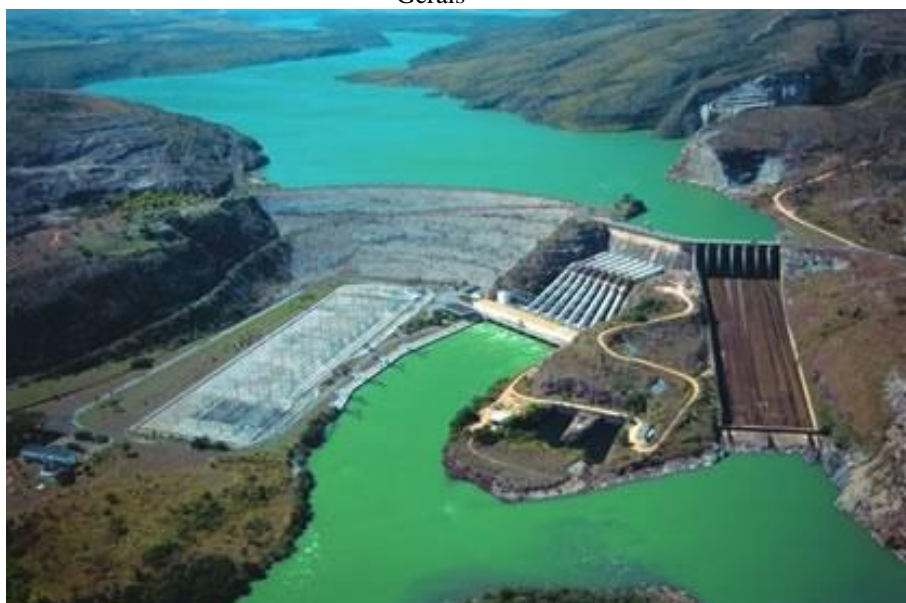


Fonte: BEAUFORTAIN TOURISME, 2011 (apud HENRI et al., 2011)

4.1.4 Enrocamento

De acordo com Costa (2012), é um aterro construído com fragmentos de rocha e cascalho e compactado em camadas com rolos vibratórios, como pode ser visto nas figuras 06 e 07. Normalmente é construída sobre fundações de rocha sã, mas também pode ser feita sobre rocha alterada, aluviões compactadas e outros materiais resistentes. Esse tipo de barragem pode ser construída com o núcleo impermeável ou com a face impermeável, em ambos os casos é predominante a vedação da água.

Figura 06: barragem de enrocamento com núcleo impermeável da usina hidrelétrica de Furnas em Minas Gerais



Fonte: FURNAS

Figura 07: barragem de enrocamento com face impermeável de concreto da usina hidrelétrica Barra Grande em Santa Catarina



Fonte: BAESA

4.1.5 Solo

Segundo Costa (2012) esse tipo é o mais comum e também o mais antigo de barragem. Pode estar apoiada em tipos variados de fundação, que vai da rocha compacta até materiais inconsolidados, e tem dois tipos: homogêneo ou zonado. O homogêneo é quando há predominância de um único material, embora, possam ocorrer elementos diversificados, como filtros por exemplo. Os taludes precisam ser suaves para que haja a estabilidade adequada. Já o tipo zonado, há um zoneamento de materiais em função de suas características de materiais e permeabilidade. Estes materiais podem ser areia, cascalho, fragmento de rocha ou uma mistura dos três. Um exemplo desse tipo pode ser conferido na figura 08.

Figura 08: barragem de solo em Congonhas – MG



Fonte: VALE, 2017

5 PROJETO DE BARRAGEM

De acordo com Matos (2012) Apesar da construção de barragens de solo ser uma obra relativamente simples, onde se utiliza materiais de baixo custo, torna-se imprescindível o estudo das normas fundamentais de segurança que tal construção exige, para que seja possível evitar que catástrofes aconteçam.

5.1 Etapas da durabilidade de uma barragem

Costa (2012) afirma que a vida útil de uma barragem é dividida em três etapas, são elas: projeto, construção e operação. O projeto considera todo o conjunto de investigações, estudos e análises que permite definir o tipo de obra e a metodologia mais adequada para a sua construção. A construção, dada por concluída após o enchimento do reservatório criado, abrange, segundo os objetivos para os quais a obra foi concebida, não apenas a barragem propriamente dita, mas todas as obras auxiliares que possibilitarão a utilização da barragem. A operação corresponde ao efetivo funcionamento da obra, que poderá ter início com o uso parcial de sua capacidade de utilização, incrementando esse uso no decorrer do tempo.

5.2 Critérios de projeto

Segundo Costa (2012), o projeto de uma barragem envolve aspectos muito diversificados, no que se refere à obra propriamente dita ou o local em que a obra será inserida. Esses fatores estão relacionados com a obra, no que diz respeito à concepção e ao dimensionamento dos diferentes componentes da obra e, podem, em geral, admitir a seguinte abordagem:

- Objetivo da obra;
- Tipo de barragem;
- Arranjo de obras;
- Dimensionamento da barragem, levando em conta suas características de deformidade, estabilidade e estanqueidade;
- Dimensionamento das obras complementares, como vertedouro, canais, túneis e casa de força, em função de critérios de projeto e segurança das obras;
- Metodologia de construção;
- Cronograma e custos;
- Monitoramento das obras projetadas;

- Critérios operacionais.

De acordo com Costa (2012), há fatores relacionados com o ambiente em que a obra será construída, esses fatores referem-se às condicionantes naturais do local de implantação da obra e do reservatório, que a priori, podem abordar os seguintes tópicos:

- Climatologia e recursos hídricos;
- Morfologia;
- Geologia e Geotecnia;
- Impactos ambientais.

A NBR 13.028/2017 especifica os requisitos mínimos para a elaboração e apresentação de projeto de barragens de mineração, disposição de rejeitos de beneficiamento, contenção de sedimentos gerados por erosão e reservação de água. A NBR 13.028/2017 e visa atender às condições de segurança, operacionalidade, economicidade e desativação, minimizando os impactos ao meio ambiente.

5.3 Fases de projeto

Conforme Costa (2012) é por meio de fases sucessivas que é possível a execução de um projeto de uma barragem, cujos objetivos e metodologia variam em função da escala de estudo e principalmente em decorrência do progressivo detalhamento que as fases mais decisivas passam a exigir. As fases de estudo de um projeto e suas principais características, apresentadas por Costa (2012), são pormenorizados a seguir.

5.3.1 Inventário ou plano diretor

De acordo com Costa (2012), essa fase corresponde a um primeiro planejamento para a escolha de locais suscetíveis de serem barrados em uma determinada bacia hidrográfica. Pode ser concluída com uma ordem de prevalência das alternativas inventariadas, em função dos objetivos e das condicionantes naturais de cada local.

5.3.2 Viabilidade

Costa (2012) afirma que os estudos específicos para uma determinada alternativa inventariada iniciam-se nessa fase, que definirá a exata posição do eixo barrável, o melhor tipo de barragem, as diferentes soluções de arranjos de obras e, principalmente, a viabilidade técnica e econômica do empreendimento. Em geral, um projeto de viabilidade não ultrapassa

dois anos de duração; todavia, no Brasil, barragens mais complexas têm extrapolado em muito esse prazo.

5.3.3 Projeto básico

Nessa fase, segundo Costa (2012), serão analisados todos os estudos e investigações necessários à configuração final do projeto de obras, é essencial fornecer todos os elementos que possibilitem licitar a construção dessas obras. Uma vez que esse projeto é fundamental para a licitação das obras, é imprescindível que as investigações realizadas conduzam a custos realísticos. Para isso, além dos estudos geotécnicos criteriosos, é preciso uma acurada análise dos problemas sociopolíticos, econômicos e ambientais. A postergação de questões fundamentais para a fase executiva, com o objetivo de minimizar os custos para viabilizar o projeto, pode onerar posteriormente a obra e, com isso, inviabilizá-la. Muitas vezes, fatores aparentemente pouco representativos para o cômputo dos custos, como a escolha do melhor equipamento ou da melhor metodologia, podem significar a diferença entre um projeto economicamente viável e um inviável.

5.3.4 Projeto executivo

Costa (2012) explica que a realização dessa fase acontece durante a construção da obra e tem um duplo objetivo: complementar o projeto básico com as informações obtidas por meio das escavações e possibilitar a modificação de algumas feições do projeto em decorrência de problemas surgidos na construção. São realizados estudos para observar o comportamento da obra durante a operação além dos estudos relacionados com o projeto da barragem. Esses estudos são geralmente desenvolvidos nos cinco primeiros anos de funcionamento da obra, período em que costumam ocorrer os principais problemas relacionados com a operação do sistema. Nessa fase, só devem ser criadas novas alternativas se surgirem novos dados que não forem conhecidos na fase anterior.

6 ASPECTOS GEOLÓGICOS

Costa (2012) aborda os aspectos geológicos, erosão e assoreamento, ligados às bacias hidrográficas e hidráulicas, pois, ambas as bacias se relacionam com o barramento de um rio.

6.1 Erosão

Pruski (2009) explica que a erosão é tão antiga quanto o próprio planeta Terra, uma vez que sua origem é por meio de fenômenos naturais que agem continuamente na crosta terrestre, como ocorrência normal do processo de modificação, constitui-se como um processo benéfico para a formação do próprio solo.

Segundo Costa (2012), a erosão é o processo de desagregação e remoção de partículas que compõe um solo ou uma rocha, pela ação combinada da gravidade com a água, vento, gelo, e organismos como plantas e animais. Em relação a barragens no Brasil, Costa (2012) explica que a erosão provocada pela água é a mais importante, visto que a água é o principal agente erosivo e a baixa incidência de erosões ocasionadas pelas demais contribuições ambientais.

De acordo com Costa (2012), a erosão ocasionada pela água pode ser pluvial, causada com o impacto da chuva, ou fluvial, provocada pelo fluxo dos rios. Em relação ao reservatório, a erosão pluvial é mais significativa, pois a área exposta a esse processo em uma bacia hidrográfica é, na maioria das vezes, maior do que pode acontecer nas margens dos rios com a erosão fluvial. Assim sendo, os fatores mais relevantes na erosão pluvial, segundo Costa (2012), são: pluviosidade, declividade, natureza do solo, cobertura vegetal e atividade antrópica.

6.1.1 Pluviosidade

Costa (2012) explica que a erosão está diretamente relacionada com a pluviosidade. Nas regiões onde a pluviosidade é concentrada em um pequeno período do ano, os efeitos das precipitações pluviais sobre a erosão são mais intensos.

6.1.2 Declividade

Segundo Costa (2012) a declividade intensifica a erosão por aumentar a velocidade de escoamento das águas percoladas.

6.1.3 Natureza do solo

De acordo com Costa (2012), a natureza do solo diz respeito à coesão das partículas que o compõe. Os solos mais suscetíveis a serem erodidos, são aqueles que possuam uma baixa, ou até mesmo nula, coesão de suas partículas.

6.1.4 Cobertura vegetal

Costa (2012) afirma que a cobertura vegetal é imprescindível como proteção dos solos contra a erosão, pois sua rede de raízes funciona como elemento fixador do solo e a copa da vegetação protege o solo do impacto direto da chuva.

6.1.5 Atividade antrópica

Conforme Costa (2012), as alterações do homem no meio ambiente também contribuem com o processo de erosão. Por exemplo, o desmatamento para a implantação da agricultura e o escoamento de água pluvial, oriunda da drenagem urbana, onde o fluxo de água é despejado em áreas periféricas, são fortes agentes erosivos.

6.2 Assoreamento

Segundo Oliveira (1998), o processo do assoreamento consiste na acumulação de partículas solidas em meio aquoso. Ocorre quando a força de arraste é extrapolada pela força da gravidade ou quando a água está supersaturada e sucede à decantação das partículas solidas.

Oliveira (1998) diz ainda que a modificação do perfil de equilíbrio do rio é um dos problemas decorrentes da construção de barragens e formação de reservatórios. O nível de base é levantado à montante da barragem, altera-se a forma do canal e a capacidade de transporte sólido. Como decorrência, ocorre o assoreamento das desembocaduras dos rios contribuintes. O assoreamento dos reservatórios de barragens pode atingir níveis que provocam a redução da vida útil dos mesmos.

De acordo com Costa (2012), um reservatório pode receber a carga sólida de três formas diferentes: do rio represado; dos tributários quem afluem diretamente ao reservatório; e das encostas que funcionam como interflúvios desses tributários.

6.3 Medidas preventivas contra erosão e assoreamento

Segundo Costa (2012) durante o estudo de um reservatório, deve-se realizar o levantamento de todas as condições que favorece a erosão e caracterizar as potencialidades morfológicas de assoreamento do futuro lago formado pela barragem. É por meio de um diagnóstico preciso dessas potencialidades que as medidas preventivas são estabelecidas, e variam desde o ataque das causas da erosão até a medida extrema de deslocar a barragem para um local melhor, pois o assoreamento pode constituir-se num fator que inviabilize a construção da obra.

Conforme Costa (2012) as medidas preventivas contra a erosão resumem-se no controle das áreas desmatadas, na proteção de pilhas de materiais soltos provenientes de rejeitos e estéreis de mineração ou da construção civil. Deve-se ainda, evitar os cortes e aterros desprotegidos contra a erosão e a exposição demorada do solo entre o desmatamento e o plantio agrícola.

Costa (2012) explica que é possível conviver com o assoreamento sem grandes traumas, desde de que seja calculado o tempo em que o assoreamento comprometerá a utilização do reservatório, em função do objetivo para o qual a barragem foi construída. Se o tempo for menor que 50 anos, indica que a obra não será viável. Para se conviver com o assoreamento, também é necessário planejar o uso das áreas assoreadas a fim de evitar sua exploração indiscriminada, que pode comprometer a utilização do reservatório remanescente. E, além disso, deve-se verificar se o assoreamento não prejudicará o eventual uso que era feito das águas armazenadas nas partes terminal e marginal do reservatório, principalmente em termos de recreação, turismo e lazer.

6.4 Instabilidade de encostas

Segundo Costa (2012) é por meio da interveniência de uma série de fatores, que atuam como agentes predisponentes à instabilização, que decorre a movimentação de massas de solos e rochas ao longo das encostas marginais de um reservatório. O enchimento do reservatório poderá atuar como agente efetivo no desencadeamento da movimentação de massa, visto que a atuação de tais agentes é, portanto, anterior à construção da barragem. A caracterização da instabilidade das encostas naturais será o objeto dos estudos da bacia hidráulica, independentemente da construção da barragem, bem como a análise de como a formação do reservatório poderá influir numa eventual instabilidade caracterizada para essas encostas.

Costa (2012) explica que é necessário definir a forma de atuação dos principais agentes predisponentes na área marginal da bacia hidráulica, pois, o assoreamento do reservatório será proveniente da movimentação de solo ao longo da bacia hidrográfica, a montante da bacia hidráulica. Assim sendo, os agentes predisponentes são agrupados nos complexos: geológico, morfológico, climático-hidrológico, biótico e antrópico.

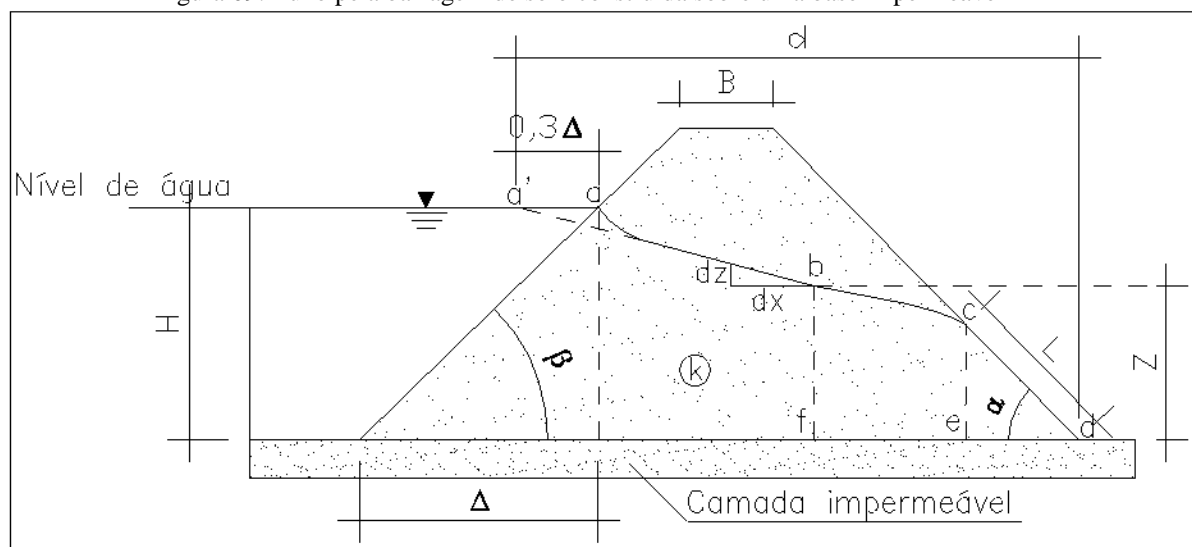
6.5 Percolação

Segundo Das (2014) a percolação da água no solo não é unidirecional nem uniforme ao longo de toda a área perpendicular ao fluxo. É por meio de gráficos chamados redes de fluxos que a percolação da água em lençóis freáticos é calculada. O conceito da rede de fluxo tem é embasada na equação de continuidade de *Laplace*, que regula a condição de percolação de um regime permanente em determinado ponto na massa de solo.

6.5.1 Percolação em barragem de solo

De acordo com Das (2014), como é visto na figura 09, k é a condutividade hidráulica do solo compactado da barragem composta e $abcd$ é a superfície livre da água que escoar através da barragem. O segmento $a'bc$, conforme Das (2014), parte do princípio básico que seja parabólico.

Figura 09: fluxo pela barragem de solo construída sobre uma base impermeável



Fonte: adaptado DAS, 2014

De acordo com Das (2014) para definir a posição da linha piezométrica, é necessário achar o valor de α , calcular Δ e em seguida $0,3$ de Δ , calcular o valor de d , e então, calcular o valor de L de acordo com a equação 05. Como é visto na figura 09.

(Equação 05)

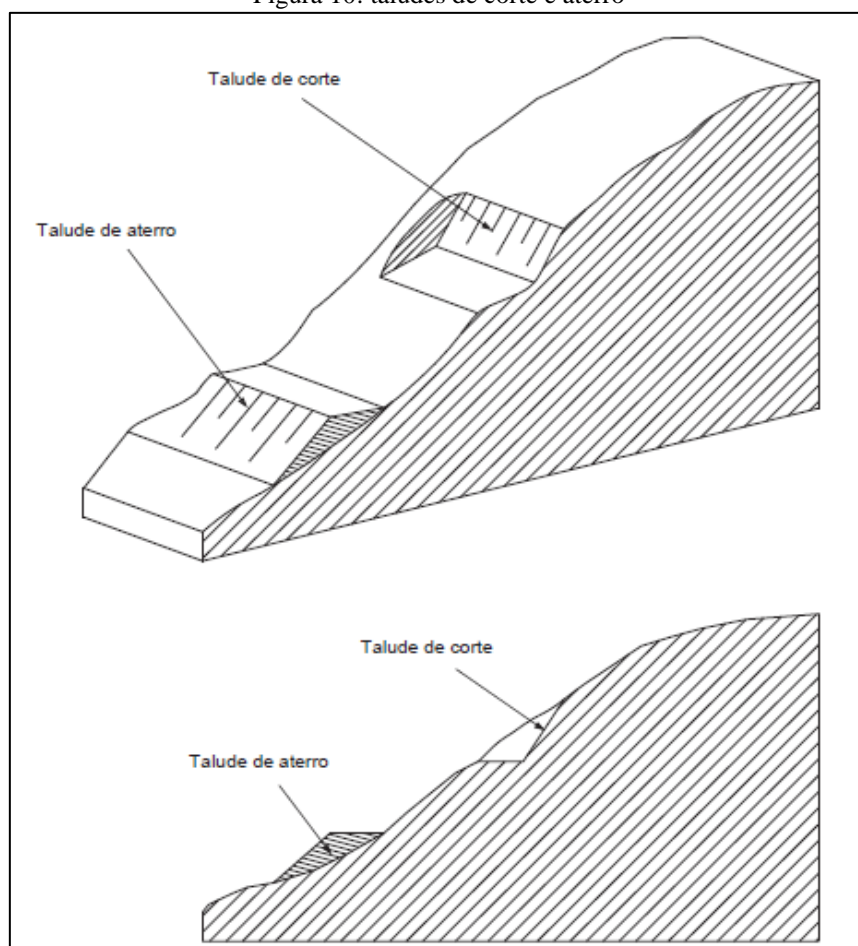
$$L = \frac{d}{\cos\alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2\alpha} - \frac{H^2}{\sin^2\alpha}}$$

Variáveis apresentadas na figura 09.

7 ESTABILIDADE DE TALUDES

A NBR 11.682/2009 prescreve os requisitos exigíveis para o estudo e controle da estabilidade de encostas e de taludes resultantes de cortes e aterros como pode ser visto na figura 10. Esta norma apresenta, também, as condições para estudos, projeto, execução, controle e observação de obras de estabilização.

Figura 10: taludes de corte e aterro



Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009

De acordo com Das (2014) o talude pode ser natural ou feito pelo homem, e é definido como uma superfície de solo exposta, formando um ângulo com o plano horizontal. O talude pode falhar de diversos modos, assim sendo, foram classificadas as rupturas de talude em cinco categorias principais, são elas: queda; tombamento; escorregamento; expansões laterais e escoamento.

Das (2014) explica que a queda consiste em um pedaço de solo despreendido que cai do talude. Já o tombamento, acontece quando o talude não resistente às forças de empuxo e tomba ao rotacionar no eixo abaixo do centro de gravidade do componente que será deslocado. Escorregamento é o deslizamento da massa de solo na superfície de ruptura.

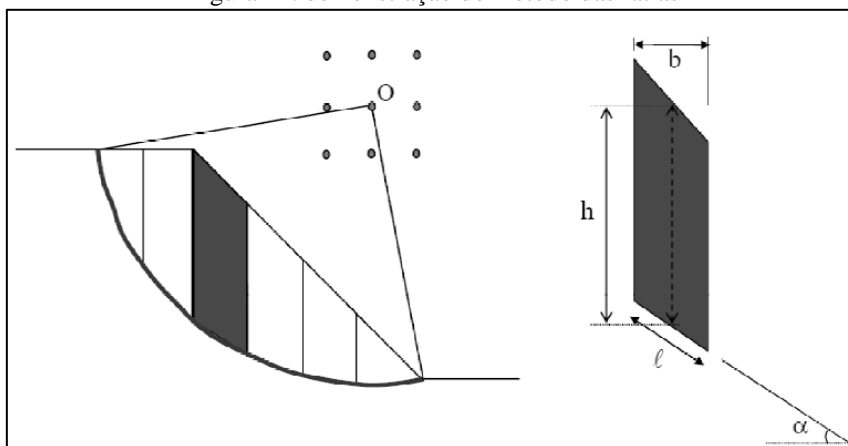
Das (2014) ainda explica que as expansões laterais, conhecidas também por espalhamento, ocorrida por translação é uma forma de escorregamento caracterizado pelo movimento súbito de uma fração de areia ou silte recoberta por argila retentora de água ou sobrecarregada por aterro. E o escoamento, a massa de solo escoo de forma similar à de fluidos viscosos.

Este trabalho abordará a categoria de escorregamento, onde serão discutidos os métodos de definição do fator de segurança.

7.1 Método comum de fatias

Segundo Das (2014) a análise de estabilidade que utiliza o método de fatias consiste em um arco de um círculo que representa a superfície de ruptura. O método de solução deve-se subdividir o talude em fatias e considerar que a base das mesmas é linear, como é demonstrado na figura 11, em seguida efetuar o equilíbrio de forças de cada fatia ao admitir que as tensões normais na base são geradas pelo peso próprio do solo, e por fim, calcular o equilíbrio do conjunto através da equação de equilíbrio de momentos.

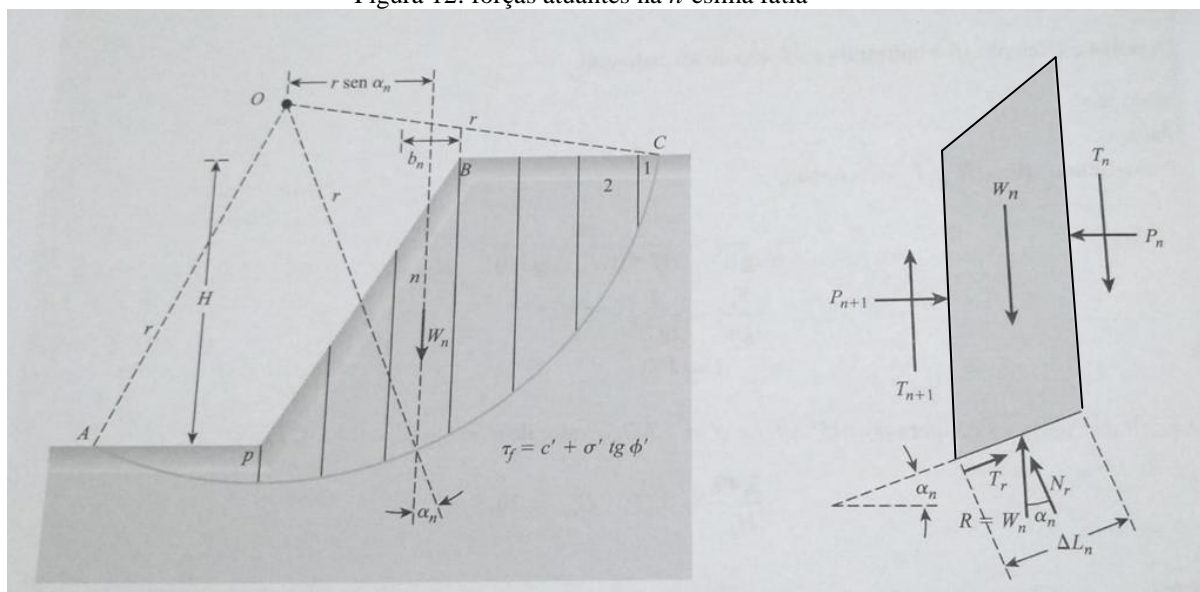
Figura 11: demonstração do método das fatias



Fonte: PEREIRA, 2019

Pereira (2019), explica que a superfície de ruptura é circular onde o centro da circunferência é representado pelo ponto (O). A massa de solo passivo de ruptura é subdividida em fatias de largura (b), não necessariamente a largura das fatias deverá ser igual, mas a base das mesmas é corrigida para um comprimento (l) linear e a altura (h) é medida no centro de cada fatia. Não deve haver mais de um tipo de solo em cada lamela e o ângulo de inclinação da base da fatia com a horizontal é (α). Como pode ser visto na figura 11.

Segundo Das (2014) as forças atuantes em cada fatia estão apresentadas na figura 12 a seguir.

Figura 12: forças atuantes na n -ésima fatia

Fonte: DAS, 2014

Onde:

 W_n = peso da fatia; N_r = componente normal da reação (R); T_r = componente tangencial da reação (R); P_n e P_{n+1} = são forças normais atuantes na fatia; T_n e T_{n+1} = são forças cisalhantes atuantes na face fatia; α_n = ângulo de inclinação da base da fatia com a horizontal; r = raio do círculo da superfície de ruptura; O = ponto central do círculo da superfície de ruptura.

Pereira (2019) explica que é preciso considerar que as forças laterais, P_n ; P_{n+1} ; T_n e T_{n+1} , a princípio, não geram momentos. Assim, a equação do equilíbrio de momentos é representada pela equação a seguir.

(Equação 06)

$$\sum(T_r \cdot r - W_n \cdot r \cdot \text{sen} \alpha_n) = 0$$

Portanto,

(Equação 07)

$$\sum T_r = \sum W_n \cdot \text{sen} \alpha_n$$

Onde:

T_r = componente tangencial da reação (R);

α_n = ângulo de inclinação da base da fatia com a horizontal;

r = raio do círculo da superfície de ruptura;

W_n = peso da fatia.

O fator de segurança (FS), segundo Marangon (2006), é obtido pela razão entre a resistência ao cisalhamento (τ_f) e as tensões cisalhantes mobilizadas (τ_{mob}). Como é visto na equação a seguir.

(Equação 08)

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}}$$

Sendo a resistência ao cisalhamento (τ_f) definida pela fórmula a seguir, de acordo com Pereira (2019).

(Equação 09)

$$\tau_f = c' + \sigma' \cdot tg\phi'$$

Onde:

τ_r = resistência ao cisalhamento;

c' = coesão;

σ' = tensão normal;

ϕ' = ângulo de atrito.

A tensão cisalhante mobilizada é definida, segundo Pereira (2019), pela fórmula a seguir.

(Equação 10)

$$\tau_{mob} = \frac{T_r}{l}$$

Onde:

τ_{mob} = tensão cisalhante mobilizada;

T_r = componente tangencial da reação (R);

l = largura da fatia.

Portanto, ao substituir as fórmulas de resistência ao cisalhamento e da tensão cisalhante mobilizada na equação do fator de segurança, têm-se:

(Equação 11)

$$FS = \frac{c' + \sigma' \cdot tg\phi'}{\frac{T_r}{l}}$$

Portanto,

(Equação 12)

$$FS = \frac{l \cdot c' + \sigma' \cdot l \cdot tg\phi'}{T_r}$$

Portanto,

(Equação 13)

$$T_r = \frac{l \cdot c' + \sigma' \cdot l \cdot tg\phi'}{FS}$$

Ou seja,

(Equação 14)

$$\sum \frac{l \cdot c' + \sigma' \cdot l \cdot tg\phi'}{FS} = \sum W_n \cdot sen\alpha_n$$

Portanto,

(Equação 15)

$$\frac{1}{FS} (c' \cdot L_a + tg\phi' \cdot \sum N_r) = \sum W_n \cdot sen\alpha_n$$

Portanto,

(Equação 16)

$$FS = \frac{c' \cdot L_a + tg\phi' \cdot \sum N_r}{\sum W_n \cdot sen\alpha_n}$$

Onde:

FS = fator de segurança;

c' = coesão;

L_a = somatório das larguras de todas as fatias;

ϕ' = ângulo de atrito;

N_r = componente normal da reação (R) da figura 11;

W_n = peso da fatia;

α_n = ângulo de inclinação da base da fatia com a horizontal.

Os métodos das fatias mais utilizados são: Fellenius, Bishop simplificado e Morgenstern-Price.

7.1.1 Fellenius

Segundo Pereira (2019) para realizar esse método deve-se considerar que não há interação entre as fatias, ou seja, admite-se que as resultantes das forças laterais em cada lado da lamela são colineares e de igual magnitude, o que permite eliminar os efeitos dessas forças considerando o equilíbrio na direção normal a base das mesmas.

Pereira (2019) explica que para efeito de cálculo as forças laterais das fatias são consideradas nulas, ou seja, $P_n + (P_{n+1}) = T_n + (T_{n+1}) = 0$, as forças podem ser vistas na figura 11. Considere-se que o equilíbrio das forças está na direção normal à base das fatias, como visto na equação a seguir.

(Equação 17)

$$N = N_r + U$$

Onde:

N = força normal;

N_r = componente normal da reação (R) da figura 12;

U = força promovida pela água.

Sendo $N = W_n \cdot \cos\alpha$, têm-se,

(Equação 18)

$$N_r = W_n \cdot \cos\alpha_n - u \cdot l$$

Onde:

N_r = componente normal da reação (R) da figura 11;

W_n = peso da fatia;

α_n = ângulo de inclinação da base da fatia com a horizontal;

u = poropressão

l = largura da fatia.

Ao acrescentar o valor de Nr na fórmula geral do fator de segurança, Pereira (2019) apresenta a seguinte equação.

(Equação 19)

$$FS = \frac{c' \cdot L_a + \text{tg}\phi' \cdot \sum(W_n \cdot \cos\alpha - u \cdot l)}{\sum W_n \cdot \text{sen}\alpha}$$

7.1.2 Bishop simplificado

De acordo com Pereira (2019), o método simplificado de Bishop é popular pelo pela facilidade e rapidez que apresenta o cálculo do fator de segurança. Esse método arbitra-se um valor de FS_1 em função de M_α , e é utilizado o fator de segurança obtido por meio da equação do método de Fellenius, como a primeira aproximação. Ao calcular M_α é possível determinar o valor do fator de segurança e se o resultado não for o mesmo que arbitrado para FS_1 , outro valor será adotado para uma nova estimativa de M_α .

(Equação 20)

$$FS = \frac{1}{\sum W_n \cdot \text{sen}\alpha} \cdot \sum \left\{ [c' \cdot l + (W_n - u \cdot l) \cdot \text{tg}\phi'] \cdot \frac{1}{M_\alpha} \right\}$$

Sendo,

(Equação 21)

$$M_\alpha = \left(1 + \frac{\text{tg}\alpha_n \cdot \text{tg}\phi'}{FS_1} \right) \cdot \cos\alpha_n$$

Pereira (2019) explica que o valor do FS_1 varia entre 10% a 25% do valor do $FS_{(Fellenius)}$.

7.1.3 Morgenstern-Price

Segundo Freitas (2011) esse método é uma aplicação do método das fatias, sendo ele o mais completo, exige cálculo computacional derivado do complexo processo iterativo. Consiste num método de análise de estabilidade de taludes no qual as condições de equilíbrio são satisfeitas e a superfície de ruptura poderá tomar qualquer forma.

De acordo com Freitas (2011) as forças atuantes na n-ésima fatia, estão representadas na figura 13, e especificadas a seguir,

E' = impulso lateral na face da fatia;

X = força vertical tangencial nas faces da fatia;

W = peso da fatia;

N' = pressão normal efetiva;

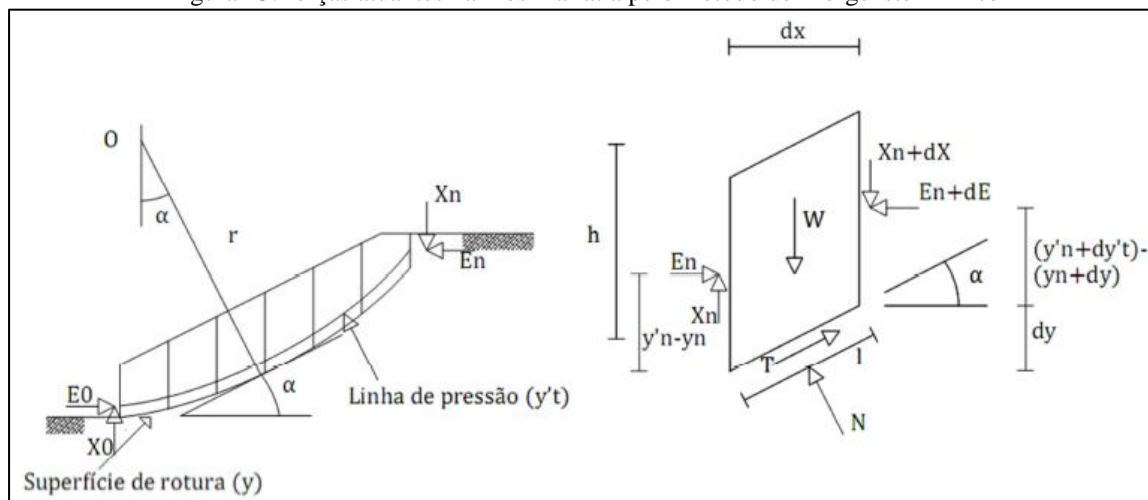
T = força tangencial atuante ao longo da base da fatia;

α = ângulo de inclinação da base da fatia com a horizontal.

Sendo as equações de equilíbrio, segundo Freitas (2011), para superfície de escorregamento, $y=y(x)$; para superfície do talude, $y=z(x)$; para posição da ação dos impulsos efetivos horizontais, i.e, linha de impulso, $y=yt'(x)$; linha de impulso da pressão de água, $y=h(x)$.

Freitas (2011) explica que a soma dos momentos no centro da base da fatia tem que ser igual a zero para que não haja rotação da fatia, igualmente neste ponto, estão aplicadas as forças N' , N e W , pelo que os seus momentos serão nulos em relação a este.

Figura 13: forças atuantes na n-ésima fatia pelo método de Morgenstern-Price



Fonte: FREITAS, 2011

Segundo Freitas (2011) a equação de equilíbrio ao ponto médio da fatia é expressa a seguir.

(Equação 22)

$$E_n \cdot \left(y - y_t + \frac{dy}{2} \right) - (E_n - dE_n) \cdot \left((y + dy) - (y_t + dy_t) - \frac{dy}{2} \right) - X \cdot \frac{dx}{2} - (X + dx) \cdot \frac{dx}{2} = 0$$

Freitas (2011) informa que ao admitir a largura da fatia a tender para um valor infinitesimal, significará que os acréscimos das forças normais e tangenciais de corte serão

infinitesimais, bem como o serão os acréscimos de largura da fatia, impulso e cota da superfície de escorregamento dx , dy' e dy , respectivamente.

De acordo com Freitas (2011) no caso em que as parcelas que multiplicam acréscimos por acréscimos serão muito pequenas a ponto de não serem consideradas na expressão geral final. Por uma questão de simplificação, as pressões neutras também não serão consideradas. Portanto, a equação de equilíbrio é representada a seguir.

(Equação 23)

$$E_n \cdot \frac{dy'_t}{dx} + (y'_T - y) \cdot \frac{dE}{dx} - X = 0$$

Freitas (2011) apresenta a seguir a equação de equilíbrio de forças local, em cada fatia, considerada nas condições normal e paralela à base da fatia e não na horizontal e vertical.

(Equação 24)

$$\text{Normal: } dN - dW \cdot \cos\alpha + dX \cdot \cos\alpha + dE \cdot \sin\alpha = 0$$

(Equação 25)

$$\text{Paralela: } dT - dE \cdot \cos\alpha - dW \cdot \sin\alpha + dX \cdot \sin\alpha = 0$$

Em que dT é definido a partir do critério de *Mohr-Coulomb*.

(Equação 26)

$$dT = \frac{1}{FS} \cdot [c' \cdot dx \cdot \sec\alpha + dN \cdot \tan\phi']$$

Onde,

dT = tensão efetiva;

c' = coesão;

ϕ' = ângulo de atrito.

De acordo com Freitas (2011) a expressão de Mohr-Coulomb supracitada, também constitui uma definição do fator de segurança, que ao desenvolver matematicamente, ocasiona em outra expressão, apresentada a seguir.

(Equação 27)

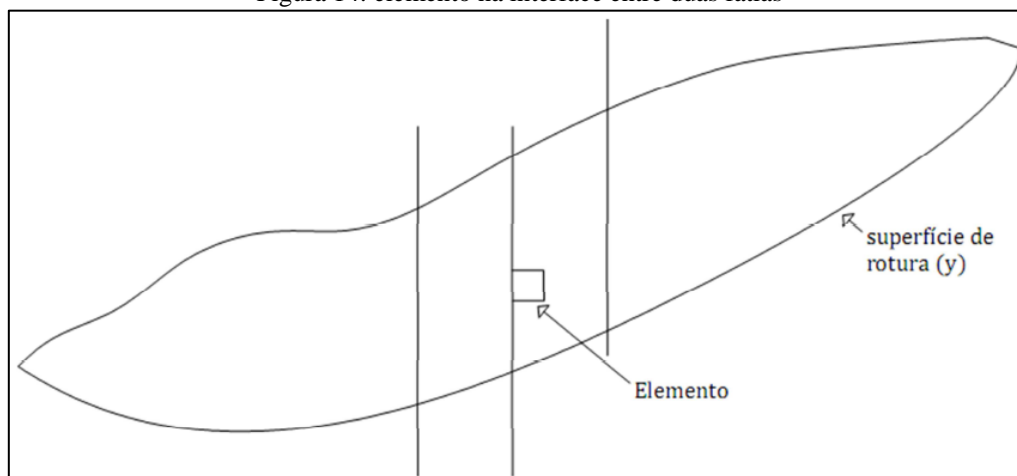
$$\frac{c'}{FS} \cdot \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right] + \frac{\tan \phi'}{FS} \cdot \left\{ \frac{dW}{dx} + \frac{dX}{dx} - \frac{dE}{dx} \cdot \frac{dy}{dx} - u \cdot \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right] \right\} = \frac{dE}{dx} + \frac{dX}{dx} \cdot \frac{dy}{dx} + \frac{dW}{dx} \cdot \frac{dy}{dx}$$

Onde, $\frac{dy}{dx} = \tan \alpha$.

Segundo Freitas as equações 21 e 22 são equações diferenciais que controlam o equilíbrio de forças e momentos em numa fatia de largura infinitesimal. Ao conter três incógnitas, sendo E e X forças de interação e y' a linha de pressão, torna-se o problema estaticamente indeterminado. Se esses esforços puderem ser determinados, as variações poderão ser previstas usando uma relação tensão deformação representativa, mas, para isso, seria necessário fazer análises de equilíbrio limite.

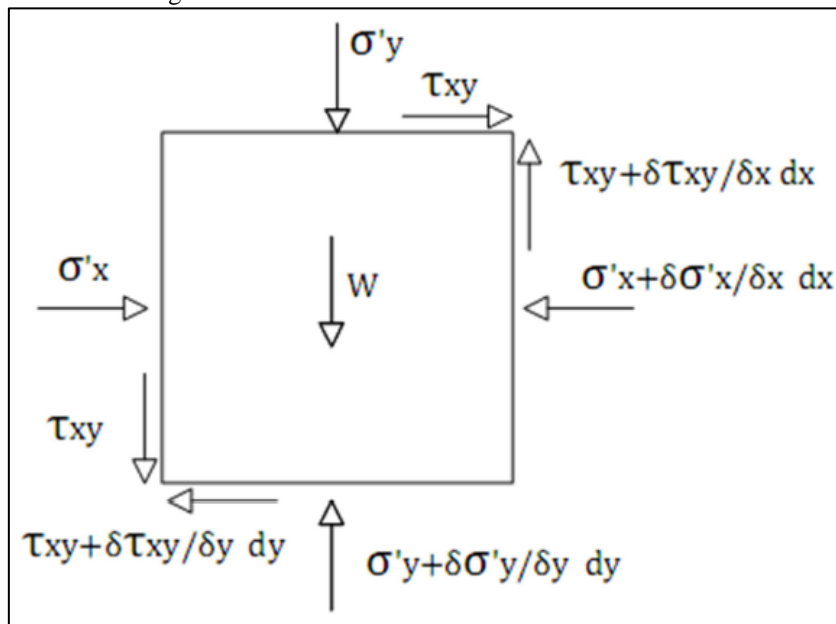
Freitas (2011) explica que é a inépcia de obter análises de esforços adequados que justifica a aplicação de métodos de equilíbrio limite, uma vez que, ao mesmo tempo, não forem conhecidos os esforços, faz com que seja necessário tomar algumas suposições, entre E e X, a isolar um elemento na interface entre duas lamelas de modo a tornar o problema estaticamente determinado. As tensões efetivas atuantes podem ser vistas na figura 14 e 15.

Figura 14: elemento na interface entre duas fatias



Fonte: FREITAS, 2011

Figura 15: tensões efetivas atuantes em um elemento



Fonte: FREITAS, 2011

Freitas (2011) explica que a fórmula a seguir determina as forças internas para uma geometria e superfície de escorregamento específico.

(Equação 28)

$$E = \int_z^y \sigma'_x(y) dy$$

(Equação 29)

$$X = \int_z^y T_x(y) dy$$

Logo,

(Equação 30)

$$X = \lambda \cdot f(x) \cdot E$$

Freitas (2011) explica que a partir de uma solução das equações diferenciais poderão ser encontrados os valores para λ e f , mas para isso o $f(x)$ tem que ser especificado para o problema se tornar estaticamente determinado. A priori, segundo Freitas (2011) a função $f(x)$ pode tomar qualquer forma, porém, o comportamento do solo impõe certas limitações que

fazem com que apenas algumas funções sejam razoáveis na prática, que, por meio da teoria elástica, estimativas dessas funções podem ser obtidas.

7.2 Estabilidade do maciço

Conforme a NBR 13.028/2017, para realizar uma análise de estabilidade, deve-se envolver, tanto isolado quanto em conjunto, o maciço da barragem. Ainda de acordo com esta norma, a análise de estabilidade envolve os maciços de partida, fundação e alteamento, cuja superfície potencial em análise deverá considerar o risco de ruptura local e global.

A NBR 13.028/2017 explica que os taludes devem ser construídos com a melhor geometria que tenha as inclinações que atendem os fatores de segurança apresentados na tabela 05. Sob o mesmo ponto de vista, de acordo com a NBR 13.028/2017, no caso de berma, a largura da mesma deve ser suficiente para as instalações de drenagem e garantir a manutenção em segurança.

Ainda, segundo a NBR 13.028/2017, o ângulo geral da barragem deve atender aos fatores de segurança, apresentados na tabela 05, enquanto as determinações de estabilidade são efetuadas para o projeto de cada fase de implantação. Em casos que utilizam parâmetros de resistência não drenada, conforma a NBR 13.028/2017, o fator de segurança mínimo deverá ser imposto pelo projetista ao se embasar nas boas práticas de engenharia.

Tabela 05: fatores de segurança mínimos para barragens de mineração

Fase	Tipo de ruptura	Talude	Fator de segurança mínimo
Final de construção ^a	Maciço e fundações	Montante e jusante	1,30
Operação com rede de fluxo em condição normal de operação, nível máximo do reservatório.	Maciço e fundações	Jusante	1,50
Operação com rede de fluxo em condição extrema, nível máxima do reservatório.	Maciço e fundações	Jusante	1,30
Operação com rebaixamento rápido do nível d'água do reservatório.	Maciço	Montante	1,10
Operação com rede de fluxo em condição normal.		Jusante	1,50
		Entre bermas	1,30
Solicitação sísmica, com nível máximo do reservatório.	Maciço e fundações	Montante e jusante	1,10

Fonte: adaptado ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017

A NBR 11.682/2009 considera que as deformações que ocorrem naturalmente no talude são desprezadas por meio das análises usuais de segurança, além disso, o valor do fator de segurança está relacionado à resistência ao cisalhamento do material do talude. Assim sendo, quanto maior o fator de segurança, maior é a segurança contra a ruptura, exceto nos casos de encostas, cuja variação dos materiais naturais pode reduzir significativamente a segurança e aumentar as chances de ocorrer uma ruptura da encosta.

A NBR 11.682/2009 recomenda a metodologia que admite o valor do fator de segurança pode variar em função da situação potencial de ruptura do talude, no que diz respeito ao perigo de perda de vidas humanas, materiais e danos ao meio ambiente. Essa metodologia, segundo a NBR 11.682/2009, consiste em classificar o projeto em níveis de segurança em relação ao risco de perdas humanas, danos materiais e ambientais, como pode ser visto nas tabelas 06 e 07.

Conforme a NBR 11.682/2009, no quadro 02, são apresentados os valores do fator de segurança, de acordo com a classificação das tabelas 06 e 07, válidos para todos os casos de carregamento definidos pelo engenheiro civil geotécnico, inclusive para situação do nível de água, sobrecargas, alterações previstas na geometria e ação de sismos.

Tabela 06: nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas

Nível de segurança	Critérios
Alto	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais, urbanos ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas. Ferrovias e rodovias de tráfego intenso.
Médio	Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas. Ferrovias e rodovias de tráfego moderado.
Baixo	Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas. Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido.

Fonte: adaptado ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009

Tabela 07: nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais

Nível de segurança	Critérios
Alto	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetam serviços essenciais. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeito e fábricas de produtos tóxicos.
Médio	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor moderado. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados.
Baixo	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor reduzido. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos.

Fonte: adaptado ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009

Quadro 02: nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais

Nível de segurança contra danos a vidas humanas Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Alto	Médio	Baixo
	Alto	1,50	1,50
Médio	1,50	1,40	1,30
Baixo	1,40	1,30	1,20

NOTA 1: No caso de grande variabilidade dos resultados dos ensaios geotécnicos, os fatores de segurança da tabela acima devem ser majorados em 10%. Alternativamente, pode ser usado o enfoque semiprobabilístico indicado no Anexo D da NBR 11.682/2009.

NOTA 2: No caso de estabilidade de lascas/bloco rochosos, podem ser utilizados fatores de segurança parciais, incidindo sobre os parâmetros γ , ϕ , c , em função das incertezas sobre estes parâmetros. O método de cálculo deve ainda considerar um fator de segurança mínimo de 1,1. Este caso deve ser justificado pelo engenheiro civil geotécnico.

NOTA 3: Esta tabela não se aplica aos casos de rastejo, voçorocas, ravinas e queda ou rolamento de blocos.

Fonte: adaptado ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009

8 INVESTIGAÇÕES PARA OBRAS DE BARRAGENS

Segundo Gil (2013), as investigações geotécnicas abrangem os meios diretos, sondagens mecânicas, e os meios indiretos, sondagens geofísicas. As investigações mecânicas indicam resultados pontuais e permitem a retirada de amostras e execução de ensaios de campo. No entanto, as investigações geofísicas envolvem a análise das características de uma parte expressiva do maciço de solo e/ou rocha. As sondagens geofísicas não abrangem a retirada de amostras e execução de outros ensaios de campo, porém, possuem o menor custo, são mais rápidas e apresentam maior facilidade de acesso a locais, ambientalmente, quase inviáveis pelos métodos diretos.

8.1 Investigações geofísicas

8.1.1 Georadar

De acordo com Gil (2013) o georadar trata-se de um método de reflexão sísmica que ao depender das características do subsolo, pode-se chegar até 10 metros de profundidade. Esse método utiliza ondas eletromagnéticas de alta frequência para mapear estruturas e feições rasas da subsuperfície. Pode ser usado em locais de pequena cobertura de solo sobre o maciço rochoso ou na detecção de estruturas enterradas em obras já implantadas.

8.1.2 Sísmica de refração

Conforme Gil (2013), a sísmica de refração é usada na fase inicial das investigações para determinar o nível d'água e o topo rochoso das ombreiras e fundação da barragem. Esse método parte do princípio básico que ondas elásticas ou ondas sísmicas emanadas de uma batida na superfície do terreno, essas ondas se propagam no subsolo, obedecendo à lei da ótica podendo refletir ou refratar quando encontram uma superfície de separação de dois meios de rigidez distintos. Entretanto, podem alcançar até 50 metros de profundidade.

8.1.3 Eletroresistividade

Gil (2013) explica que a eletroresistividade trata-se da determinação da resistividade elétrica aparente dos materiais em pontos da superfície. É por meio de injeções de corrente elétrica por eletrodos metálicos em pontos da área investigada que os resultados são obtidos. Poderia dar apoio às investigações mecânicas bem como na determinação do topo rochoso e profundidade do nível freático.

8.2 Investigações mecânicas

8.2.1 Sondagem a trado

Segundo Gil (2013), a sondagem a trado é realizada ao longo do eixo da barragem e nas áreas de empréstimo de solos argilosos e servem para execução de ensaios de infiltração. Os trados podem ser tipo concha ou tipo helicoidal, correspondendo suas formas a geometria dos próprios nomes. Nas áreas de empréstimos o diâmetro adotado é maior devendo atender a quantidade maior de amostras para ensaios de laboratório.

8.2.2 Sondagem à percussão

De acordo com Gil (2013) a sondagem à percussão, também conhecida como o ensaio SPT, é realizada por meio de um peso de 65 kg, que cai de uma altura de 75 cm sobre uma cabeça batente acoplada nas hastes padronizadas. No fundo do furo, acopladas a um amostrador padrão, essas hastes penetram o solo e recolhem amostras do mesmo. São realizadas três séries de golpes, sendo é necessário contar o número de golpes para penetrar 15 cm do amostrador.

Por definição da norma NBR 6.484/2001, SPT é a abreviatura de *standard penetration test*, em português significa teste de penetração padrão. É por meio deste ensaio que é determinado o índice de resistência à penetração, representado pela letra N, que por sua vez, é a abreviatura do índice de resistência à penetração do SPT. N é definido pelo número de golpes correspondente à cravação de 30 cm do amostrador, após a cravação inicial de 15 cm.

Esses furos de sondagens podem ser usados também para executar ensaio de infiltração em solo. Através da análise das amostras de solo e da resistência apresentada pelo terreno, são desenhadas seções que permitem definir as cotas das fundações das barragens e das estruturas hidráulicas. (GIL, 2013, p. 41)

8.2.3 Sondagem Rotativa

Gil (2013) explica que é utilizada uma coroa diamantada, que é uma ferramenta de corte acoplada a um barrilete amostrador localizado na extremidade inferior da sondagem, para penetrar no maciço rochoso. Esse processo se faz por rotação e injeção de fluido de perfuração para resfriamento da coroa diamantada. A injeção de fluido também auxilia na retirada da fração arenosa resultante do corte da rocha pela coroa diamantada.

9 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL DE SOLOS

9.1 Ensaio de granulometria

Segundo Das (2014), A análise granulométrica, é expressa como uma porcentagem do peso seco total, determinada pelo tamanho das partículas presentes em um solo. Das (2014), diz ainda que para encontrar a distribuição granulométrica do solo, pode-se utilizar o ensaio de peneiramento, para partículas com diâmetros maiores que 0,075 mm, ou o ensaio de sedimentação, para partículas com diâmetros menores que 0,075 mm. As peneiras utilizadas nos ensaios de peneiramento e sedimentação estão apresentadas na tabela 08 de acordo com a NBR 7.181/2016

Tabela 08: peneiras para ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação

Peneira (malha)	Abertura (mm)
2"	50
1 1/2"	38
1"	25
3/4"	19
3/8"	9,5
(4)	4,8
(10)	2,0
(16)	1,2
(30)	0,6
(40)	0,425
(60)	0,25
(100)	0,15
(200)	0,075

Fonte: adaptado ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016 (*apud* PEREIRA, 2019)

9.1.1 Ensaio de peneiramento

O processo de realização do ensaio, segundo a NBR NM 248/2003, consiste em secar a amostra de solo em estufa, com a temperatura na faixa de 105°C a 110°C, em seguida, após a amostra ter esfriado em temperatura ambiente, é necessário quebrar todos os torrões em pequenas partículas, uma vez que esses torrões, na maioria das vezes, não se desfazem com a peneiração e ficam retidos na peneira com abertura menor que seu tamanho, e assim, interferem na curva de distribuição granulométrica.

De acordo com Das (2014), a amostra é pesada e em seguida peneirada por uma pilha de peneiras com aberturas de malhas de tamanho decrescente, do topo para o final, e embaixo da pilha é posicionado um recipiente chamado fundo. Após o solo ser peneirado, é determinado a massa retida em cada peneira.

Das (2014) explica que a porcentagem passante é obtida por meio de um cálculo, onde a massa acumulada acima de cada peneira é subtraída da massa total da amostra, em seguida, o resultado dessa subtração é dividido pela massa total da amostra e, por último, multiplicado por 100. É por meio desse cálculo que é gerada a curva de distribuição granulométrica.

9.1.2 Ensaio de sedimentação

Segundo Das (2014), a base desse ensaio é o princípio da sedimentação dos grãos de solo na água. Quando uma amostra de solo é dispersa na água, as partículas sedimentam em velocidades diferentes ao depender de sua forma, tamanho, peso e da viscosidade da água. Para simplificação, é presumido que todas as partículas de solo sejam redondas e que a velocidade das mesmas possa ser expressa pela lei de Stoke.

De acordo com a NBR 7.181/2016 para realizar a sedimentação e o peneiramento fino, é preciso cerca de 120 g do material passado na peneira de 2,0 mm, no caso de solos arenosos, ou, 70 g no caso de solos siltosos e argilosos. Deve-se ainda determinar a massa deste material e segundo a NBR 6.457/2016 deve-se reservar cerca de 100 g para três determinações da umidade higroscópica (w). Em seguida deve-se transferir o material para um béquer de 250 cm³ e, com auxílio de proveta, juntar com o defloculante, 125 cm³ de solução de hexametáfosfato de sódio com a concentração de 45,7 g do sal por 1 000 cm³ de solução.

No laboratório, o ensaio de sedimentação é conduzido em uma proveta geralmente com 50 g de amostra seca em estufa. Às vezes, amostras de 100 g também podem ser utilizadas. A proveta tem 457 mm de altura e 63,5 mm de diâmetro. É marcado para um volume de 1000 ml. O hexametáfosfato de sódio geralmente é utilizado como agente dispersante. O volume da suspensão dispersa do solo é elevado para 1000 ml pela adição de água destilada. Um densímetro do tipo ASTM 152H é colocado no cilindro de sedimentação. (DAS; SOBHAN, 2014, p. 36)

Segundo a NBR 7.181/2016 são efetuadas as leituras do densímetro correspondentes aos tempos de sedimentação (t) de 0,5 min, 1 min e 2 min. Em seguidas após retirar o densímetro de forma lenta e cuidadosa, deve-se fazer as leituras subsequentes a 4 min, 8 min,

15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, e 24 h, assim que iniciar a sedimentação. Após realizar a última leitura, deve-se lançar o material da proveta na peneira de 0,075 mm, proceder à remoção com água de todo o material que tenha aderido às suas paredes e, com o material ainda na peneira, é preciso lavar o mesmo com água potável à baixa pressão. Assim sendo, com o material retido na peneira de 0.075 mm, será seco em estufa e passado por uma série de peneiras.

9.1.3 Curva de distribuição granulométrica

De acordo com Das (2014) uma curva de distribuição granulométrica pode ser utilizada para determinar quatro parâmetros do solo, são eles:

- a. Diâmetro efetivo (D_{10}): indica o diâmetro onde passa apenas 10% em massa na curva granulométrica.
- b. Coeficiente uniforme (C_u): definido por meio da seguinte equação.

(Equação 31)

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Onde:

D_{60} = diâmetro que corresponde a 60% de grãos finos;

D_{10} = diâmetro efetivo.

- c. Coeficiente de curvatura (C_c): definido por meio da seguinte equação.

(Equação 32)

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \cdot D_{10}}$$

Onde:

D_{60} = diâmetro que corresponde a 60% de grãos finos;

D_{10} = diâmetro efetivo;

D_{30} = diâmetro que corresponde a 30% da massa passante.

- d. Coeficiente de segregação (S_0): é uma medida de uniformidade, definido por meio da seguinte equação.

(Equação 33)

$$S_0 = \sqrt{\frac{D_{75}}{D_{25}}}$$

Onde:

D25 = diâmetro que corresponde a 25% da massa passante;

D75 = diâmetro que corresponde a 75% da massa passante.

Segundo Nogueira (1995) a curva granulométrica permite, além de dar um nome ao solo, obter os valores dos diâmetros necessários para o cálculo dos coeficientes de não uniformidade e de curvatura, da fração grossa do solo ou dos materiais granulares.

Nogueira (1995) explica que para realizar a classificação textural do solo, é preciso a escala que define os intervalos de variação dos tamanhos das partículas para cada um dos grupos de solo juntamente com a curva granulométrica resultante.

9.2 Ensaio de compactação

De acordo com Nogueira (1995) a compactação do solo se faz por meio da aplicação de um processo estático ou dinâmico que é reduzido o volume de vazio do solo, e por consequência, torna-o mais denso, mais resistente ao cisalhamento e diminui a permeabilidade e compressibilidade

Segundo Nogueira (1995) o ensaio de compactação realizado em laboratório tem a finalidade de determinar a função de variação da massa específica seca com o teor de umidade, para uma dada energia de compactação e que é aplicada ao solo através de um processo dinâmico. Essa função define um ponto cujo teor de umidade ótimo e a massa específica seca máxima, são características possíveis de reproduzir desse solo, para as mesmas condições de ensaio.

A NBR 6.457/2016 é aplicada no método para determinação do teor de umidade de solos em laboratório e, também, especifica o método para a preparação de amostras de solos para os ensaios de compactação, análise granulométrica, determinação dos limites de liquidez e de plasticidade, massa específica das partículas que passam na peneira de 4,8 mm, a absorção de água e massa específica aparente dos grãos retidos na peneira de 4,8 mm.

Segundo a NBR 6.457/2016 há três processos de preparação das amostras para ensaio de compactação, sendo o primeiro a secagem prévia até uma umidade higroscópica, o segundo refere-se à preparação a 5% abaixo da umidade ótima presumível e o terceiro é a preparação a 3% acima da umidade ótima presumível. Tanto no segundo quanto no terceiro processo, de acordo com a NBR 6.457/2016, a amostra deverá ser embalada para evitar perda de umidade durante o seu transporte.

9.2.1 Proctor normal

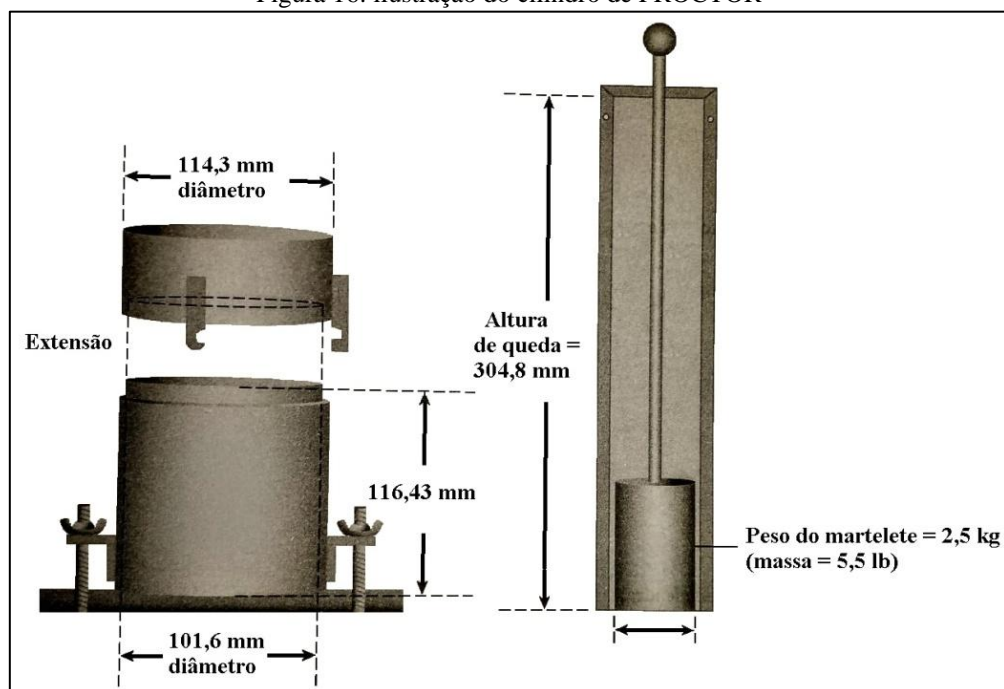
Das (2014) explica que o ensaio de compactação Proctor é um teste de laboratório geralmente usado para determinar o peso específico seco máximo de compactação e o teor de umidade ótimo.

No ensaio de Proctor normal, o solo é compactado em um molde com volume de 944 cm³. O diâmetro do molde é 101,6 mm. Durante o ensaio laboratorial, o molde é anexo a uma placa de suporte na parte inferior e estende-se para a parte superior. O solo é misturado com várias quantidades de água e, depois, compactado em três camadas iguais por um soquete que golpeia 25 vezes cada camada. O marteleto tem uma massa de 2,5 kg e tem uma altura de queda de 30,5 cm. (DAS; SOBHAN, 2014, p. 116)

Segundo a NBR 7.182/2016 o ensaio pode ser realizado com ou sem reuso de material, com ou sem secagem prévia da amostra até a umidade higroscópica, com ou sem as amostras preparadas a 5% abaixo da umidade ótima presumível ou a 3% acima da umidade ótima presumível.

A NBR 7.182/2016 explica que para realizar o ensaio, deve-se fixar o molde cilíndrico à sua base, em seguida, acoplar o cilindro complementar apresentado na ilustração da figura 16 e apoiar o conjunto em uma base rígida. É recomendado evitar a aderência do solo compactado com a superfície metálica da base por meio de uma folha de papel filtro com diâmetro igual ao do molde utilizado.

Figura 16: ilustração do cilindro de PROCTOR



Fonte: DAS, 2014

Segundo a NBR 7.182/2016 antes do processo de compactação, o material da amostra deve estar completamente homogeneizado. Para proceder à sua compactação é utilizado um soquete. O número de camadas e o número de golpes por camada são correspondentes à energia de compactação desejada, como é visto na tabela 09.

Tabela 09 energia de compactação

Cilindro Pequeno (PROCTOR)	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal Pequeno	Intermediária Grande	Modificada Grande
	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camadas	26	21	27

Fonte: adaptado ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016

A NBR 7.182/2016 informa que os golpes do soquete devem ser aplicados perpendicularmente e distribuídos uniformemente sobre a superfície de cada camada, de alturas aproximadamente iguais, ao certificar de que o soquete deslize na haste em queda

livre. A compactação de cada camada deve anteceder de uma ligeira escarificação da camada subjacente.

Segundo a NBR 7.182/2016 após a compactação da última camada, deve-se escarificar o material em contato com a parede do cilindro complementar, feito isso, com a ajuda de uma espátula, é retirado o cilindro complementar. Em seguida é removido o molde cilíndrico de sua base e rasar também a outra face. Pesar o conjunto, e, por subtração da massa do molde cilíndrico, obter a massa úmida do solo compactado (M_u). Com auxílio do extrator, é retirado o corpo de prova do molde, e de acordo com a NBR 6.457/2016 deve-se reservar uma amostra para determinação da umidade (w).

A NBR 7.182/2016 explica que com o auxílio de uma desempenadeira e uma espátula deve-se destorroar o material até que passe integralmente na peneira de 4,8 mm ou na de 19 mm. Em seguida é adicionado água destilada para juntar o material de forma a incrementar o teor de umidade em aproximadamente 2 %. Assim sendo, é recomendado repetir todo o processo até que sejam obtidos cinco pontos da curva de compactação.

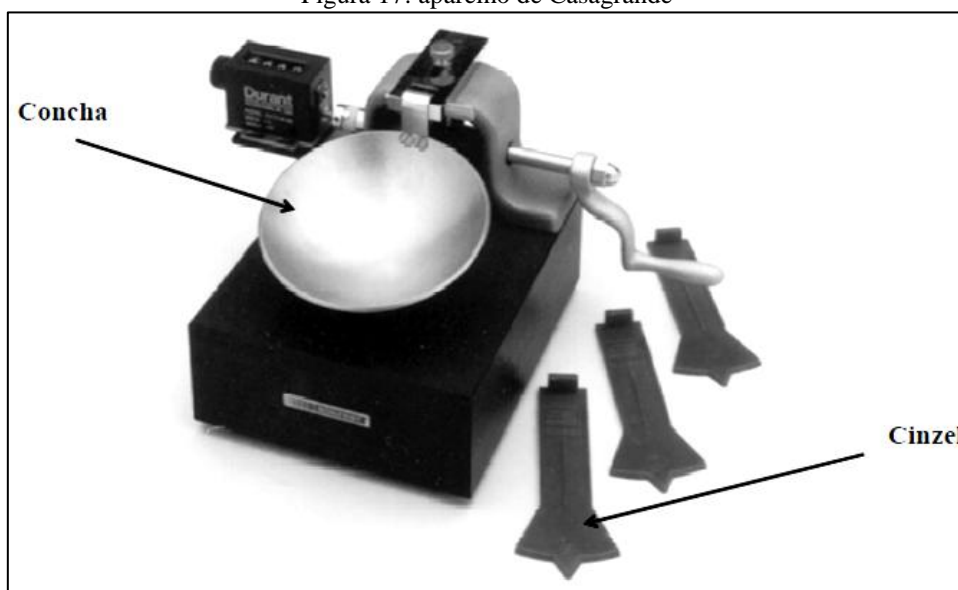
9.3 Ensaio de limite de liquidez e limite de plasticidade

De acordo com a NBR 6.457/2016 os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade compartilham as mesmas operações preliminares, onde é instruído a secar a amostra fora da estufa, a desmanchar os torrões de terra para homogeneizar a amostra que em seguida passará na peneira de abertura de 0,42 mm. Com o material passante na peneira em mãos, será feitos ambos os ensaios.

9.3.1 Limite de liquidez (LL)

Segundo Nogueira (1995) o limite de liquidez marca a transição do estado plástico ao estado líquido, onde o teor de umidade do solo é expresso em termos percentuais. O ensaio é realizado por meio de um aparelho normalizado, conhecido como aparelho de Casagrande, que de acordo com Caputo (1988), consiste em um prato de latão, em forma de concha apoiado por um suporte de ebonite. Também há uma manivela que ao rotacionar, o prato sofrerá, repetidamente, quedas de um centímetro de altura de constante intensidade. após 25 golpes da concha sobre a base desse aparelho, deve-se unir ao menos um centímetro de comprimento das bordas inferiores de uma canelura, feita por meio de um cinzel, em uma massa de solo. O aparelho de Casagrande e o cinzel podem ser vistos na figura 17.

Figura 17: aparelho de Casagrande



Fonte: PEREIRA, 2019

A NBR 6.459/2016 especifica o método para a definição do limite de liquidez dos solos e explica que deve colocar a amostra em uma cápsula de porcelana e adicionar aos poucos água destilada. Cada vez que a água é adicionada, é preciso misturar bem até obter uma pasta homogênea em uma consistência que é necessário dar 35 golpes, por meio do aparelho de Casagrande, para fechar uma ranhura. O ensaio deverá ser executado em condições ambientais que minimizam a perda de umidade do material por evaporação e a amostra será preparada conforme os processos da NBR 6.457/2016.

9.3.2 Limite de plasticidade (LP)

De acordo com Das (2014) o limite de plasticidade é definido como o teor de umidade expresso em termos percentuais, em que o solo fissura, quando moldado em cilindro de 3,2 mm de diâmetro. O limite de plasticidade é caracterizado como o limite inferior do intervalo de plasticidade do solo.

Segundo a NBR 7.180/2016 que especifica o método para definição do limite de plasticidade e para o cálculo do índice de plasticidade do solo, informa que o ensaio, assim como no ensaio de limite de liquidez, deverá ser executado em condições ambientais que minimizam a perda de umidade do material por evaporação, de preferência, em recintos climatizados.

A NBR 7.180/2016 explica que o processo de realização do ensaio consiste em colocar a amostra em uma cápsula de porcelana adicionar água destilada aos poucos, amassando e revolvendo, vigorosamente e continuamente, com o auxílio da espátula, de

forma a obter uma pasta homogênea, de consistência plástica. O tempo de homogeneização varia em média entre 15 minutos e 30 minutos, mas para solos mais argilosos o intervalo de tempo é maior. Com aproximadamente 10 g da amostra deve-se fazer uma bola com a massa de solo para moldar-se repetidamente em um formato elipsoidal, de três milímetros de diâmetro e 100 milímetros de comprimento, com as mãos sobre uma placa de vidro e em seguida, deve-se colocar a amostra, no mínimo, em três cápsulas para determinar o teor de umidade conforme a NBR 6.457/2016.

A NBR 6.457/2016 informa que as cápsulas com as amostras, deverão permanecer em estufa, em um intervalo de tempo de 16 a 24 horas, à temperatura de 105 °C a 110 °C exceto os solos orgânicos, turfosos ou contendo gipsita pois serão secados em estufa, à temperatura de 60 °C a 65 °C, em maiores intervalos de tempo para secagem. Feito isso, o próximo passo é calcular o teor de umidade com a seguinte equação:

(Equação 34)

$$W = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \cdot 100$$

Onde:

W = teor de umidade expresso em porcentagem (%);

M1 = massa do solo úmido mais a massa do recipiente expresso em gramas (g);

M2 = massa do solo seco mais a massa do recipiente expresso em gramas (g);

M3 = massa do recipiente expresso em gramas (g).

9.4 Ensaio com cilindro de cravação

Segundo a NBR 9.813/2016 esse ensaio é um método para determinar a massa específica aparente do solo com o uso do cilindro de cravação cuja ilustração pode ser vista na figura 18, aplicado somente a solos coesivos de granulação fina, com consistência mole, fora os pedregulhos.

Figura 18: equipamento de cravação



Fonte: PEREIRA, 2014

De acordo com a NBR 9.813/2016 o ensaio consiste em assentar o cilindro de cravação nivelado na superfície do terreno e isento de partículas soltas, em seguida, deve-se montar o restante do equipamento e por meio da queda livre do soquete inicia-se a cravação do cilindro.

A NBR 9.813/2016 informa que a cravação deve ser contínua, até o ponto em que o cilindro fique com sua borda superior 1,0 cm abaixo da superfície do terreno, logo após, é preciso escavar o solo ao lado e, no mínimo cinco centímetros, abaixo do cilindro com auxílio de pá e picareta. Com auxílio de uma régua biselada é nivelado às faces do corpo de prova e removido o excesso de solo. A massa do cilindro com a amostra deve ser determinada imediatamente, para não perder a umidade.

De acordo com a NBR 9.813/2016 é possível calcular a massa específica aparente natural do solo *in situ* por meio da equação 05 e a massa específica aparente seca do solo *in situ* de acordo com a equação 06.

(Equação 35)

$$\rho_{nat} = \frac{M_t - M_C}{V_C}$$

Onde:

ρ_{nat} = massa específica aparente natural do solo in situ, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3);

M_t = massa do cilindro com a amostra úmida, expressa em gramas (g);

M_C = massa do cilindro, expressa em gramas (g);

V_C = volume interno do cilindro, expresso em centímetros cúbicos (cm^3).

(Equação 36)

$$\rho_d = \rho_{nat} \cdot \frac{100}{100 + W}$$

Onde:

ρ_d = massa específica aparente seca do solo in situ, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3);

ρ_{nat} = massa específica aparente natural do solo in situ, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3);

W = teor de umidade do solo in situ, expresso em porcentagem (%).

10 MATERIAIS E MÉTODOS

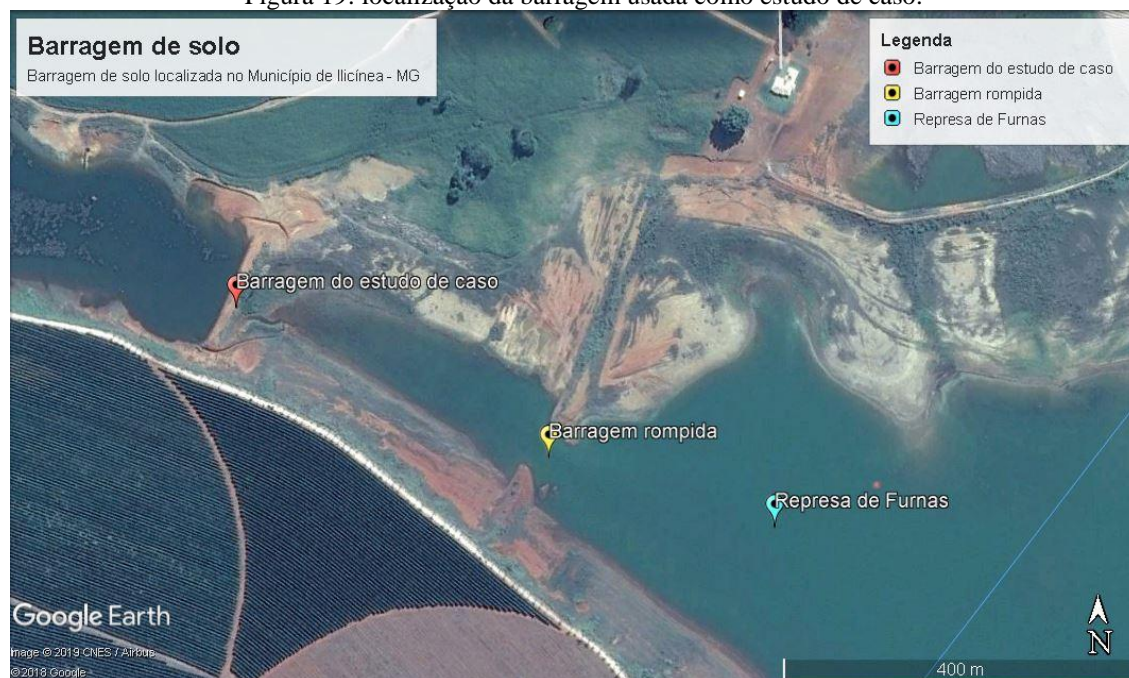
Este trabalho está embasado no conhecimento adquirido por meio de uma pesquisa bibliográfica em livros, teses e dissertações além das notas de aula oriundas do estudo em sala de aula. Além da bibliografia, foram utilizados os softwares: AutoCAD, Excel e GeoStudio.

10.1 Estudo de caso

Para atingir o objetivo deste trabalho, foi realizado um estudo de caso de uma barragem de solo em uma propriedade rural, localizada no município de Ilícinea – MG. A barragem em questão foi estudada em outro trabalho de conclusão de curso, porém não foi abordado o fator de segurança para análise de estabilidade global da estrutura.

A barragem utilizada como estudo de caso neste trabalho foi à solução que Costa (2015) propôs devido ao rompimento de outra barragem na mesma propriedade. Costa (2015) explica que ambas as barragens foram utilizadas para irrigação, porém, devido ao rompimento da primeira, a barragem estudada neste trabalho foi construída a montante e instalada no final do canal abastecedor, onde em seguida deságua no reservatório de Furnas. A localização da barragem pode ser vista na figura 19.

Figura 19: localização da barragem usada como estudo de caso.



Fonte: GOOGLE EARTH, 2019

Segundo Costa (2015) para a construção do aterro da barragem não foram realizados nenhum ensaio, por isso retiraram amostras de material na área de alagamento da barragem e

encaminharam a um laboratório para obter dados das características físicas. Assim sendo, tiveram os resultados da granulometria onde a característica do solo é de 48% de argila, 32% de silte e 20% de areia média grossa, ou seja, consiste em uma argila silto arenosa de acordo com o sistema unificado de classificação do solo. O peso específico seco (γ_d) de 14,40 kN/m³, teor de umidade de 19,1%, índice de plasticidade de 24%. E os resultados pelo ensaio de Proctor normal, peso específico seco máximo ($\gamma_{d\text{máx.}}$) de 15,80 kN/m³, fator de empolamento do solo 40%, fator de contração do solo 0,88%, umidade ótima de 22,4% variação de $\pm 3\%$ e o grau de compactação definido por Proctor normal é de 95%.

Costa (2015) explica que a recomendação da literatura inerente informa que para um maciço ser construído com segurança e estabilidade, deve-se seguir os parâmetros, sendo a escolha do local a ser construído, a análise das características do solo onde será construída a barragem, definição do tipo de barragem a ser construída, altura da lâmina d'água desejada de acordo com o volume pretendido, cálculo da altura da barragem, definição de inclinação de taludes de montante e jusante, cálculo da base e da crista do maciço da barragem e a definição de necessidade de núcleo impermeável.

Costa (2015) apresenta as referências da altura da lâmina d'água, sendo cinco metros a diferença de cotas, um metro e meio a altura de enchente (H_v), meio metro de altura de folga (H_f) e sete metros de altura da barragem. E no que diz respeito aos taludes, tanto o talude de montante quanto o talude de jusante, têm-se a inclinação 2.5:1. A dimensão da crista da barragem é de quatro metros e meio, e a largura da base do maciço da barragem é de 39,5 metros, como é visto no Anexo A.

Costa (2015) explica que por meio de uma sondagem do terreno, atingiu um solo impermeável a uma profundidade de 2,30 metros, por esse motivo o núcleo da barragem foi construído a uma profundidade de 2,50 metros.

De acordo com Costa (2015) o solo utilizado na construção do aterro da barragem foi retirado da área de futuro alagamento, “por se tratar, a olhos nus, de solo com boas características físicas para construção” (COSTA, 2015, p. 88).

Costa (2015) explica que o comprimento do aterro foi definido em planta topográfica, a forma da barragem é trapezoidal cuja altura é de sete metros determinada por cota altimétrica 768 m mais a altura de ondas e segurança/ folga. A base maior, inferior, com medidas de 39,5 m de largura por 170 m de comprimento e a base menor, superior, com 4,5 m de largura por 170 m de comprimento, utilizada também como estrada. Ambos os taludes

tem a inclinação de 2,5 m para cada 1,0 m de altura, e o núcleo impermeável com largura de 3 m e a altura de 5 m.

10.2 Parâmetros geotécnicos

Costa (2015) apresenta os seguintes parâmetros geotécnicos, obtidos por ensaios em laboratório:

Peso específico seco (γ_d) = 14,40 kN/m³;

Teor de umidade (w) = 19,1%;

Índice de plasticidade (IP) = 24%;

Peso específico seco máximo γ_d máx = 15,80 kN/m³;

Fator de empoamento do solo = 40%;

Fator de contração do solo = 0,88%;

Umidade ótima (ω) = 22,4%

Grau de compactação (GC) = 95%

É necessário conhecer o peso específico (γ), a coesão (c') e ângulo de atrito (ϕ') do solo para realizar o cálculo do fator de segurança por meio dos métodos de Fellenius, Bishop simplificado e Morgenstern-Price. Para isso, foi preciso realizar correlações para obter esses parâmetros.

Com o uso da Equação 04, será obtido o valor do peso específico (γ), como é apresentado a seguir.

$$\gamma = 15,80 \cdot (1 + 0,224) = 19,34 \text{ kN/m}^3$$

Com o peso específico natural definido, foi calculado o peso específico saturado do material do corpo da barragem por meio da equação 36.

(Equação 37)

$$e = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{\gamma_d} - 1$$

Onde:

e = índice de vazio;

G_s = peso específico relativo de solo;

γ_w = peso específico da água;

γ_d = peso específico seco do solo.

Logo, ao substituir os dados, sendo que o peso específico relativo (G_s), conforme Das (2014), é definido como a razão do peso específico pelo peso específico da água. Das (2014) diz ainda que para solos como argila, o valor de G_s varia entre 2,60 a 2,90. Ao utilizar o valor de G_s igual a 2,70 que é o utilizável para solos em geral, quando ocorre a inexistência de ensaios, têm-se:

$$e = \frac{2,70 \cdot 10,00}{15,80} - 1$$

$$e \cong 0,71$$

Com o valor do índice de vazio, é possível calcular o peso específico saturado do solo, por meio da seguinte equação.

(Equação 38)

$$\gamma_{\text{Sat}} = \frac{(G_s + e) \cdot \gamma_w}{1 + e}$$

Onde:

e = índice de vazio;

G_s = peso específico relativo de solo;

γ_w = peso específico da água;

γ_{Sat} = peso específico saturado do solo.

Logo, ao substituir os dados, têm-se:

$$\gamma_{\text{Sat}} = \frac{(2,70 + 0,71) \cdot 10,00}{1 + 0,71}$$

$$\gamma_{\text{Sat}} = 19,94 \text{ kN/m}^3$$

Em contraste, por falta de ensaios e parâmetros geotécnicos, os ângulos de atrito e as coesões, abordados nos cálculos deste trabalho, foram todos estabelecidos por meio da literatura específica abordadas nas tabelas 01 e 02. Assim sendo, o ângulo de atrito será de 24° e a coesão de 2 tf/m² ou 20 kPa, como é apresentado na tabela 10.

Tabela 10: parâmetros geotécnicos para cálculo do fator de segurança

Parâmetros Geotécnicos	
γ	19,34 kN/m ³
γ_{sat}	19,94 kN/m ³
c'	20 kPa
ϕ'	24°

Fonte: o autor, 2019

Para realizar este trabalho, foram feitas seis combinações diferentes com os parâmetros supracitados. Como são apresentados nas tabelas 11, 12, 13, 14, 15 e 16.

Tabela 11: parâmetros geotécnicos para cálculo do fator de segurança – primeira combinação

Parâmetros Geotécnicos	
γ	19,34 kN/m ³
γ_{sat}	19,94 kN/m ³
c'	20 kPa
ϕ'	15°

Fonte: o autor, 2019

Tabela 12: parâmetros geotécnicos para cálculo do fator de segurança – segunda combinação

Parâmetros Geotécnicos	
γ	19,34 kN/m ³
γ_{sat}	19,94 kN/m ³
c'	20 kPa
ϕ'	30°

Fonte: o autor, 2019

Tabela 13: parâmetros geotécnicos para cálculo do fator de segurança – terceira combinação

Parâmetros Geotécnicos	
γ	19,34 kN/m ³
γ_{sat}	19,94 kN/m ³
c'	12,50 kPa
ϕ'	24°

Fonte: o autor, 2019

Tabela 14: parâmetros geotécnicos para cálculo do fator de segurança – quarta combinação

Parâmetros Geotécnicos	
γ	19,34 kN/m ³
γ_{sat}	19,94 kN/m ³
c'	50 kPa
ϕ'	24°

Fonte: o autor, 2019

Tabela 15: parâmetros geotécnicos para cálculo do fator de segurança – quinta combinação

Parâmetros Geotécnicos	
γ	10,00 kN/m ³
γ_{sat}	16,30 kN/m ³
c'	20 kPa
ϕ'	24°

Fonte: o autor, 2019

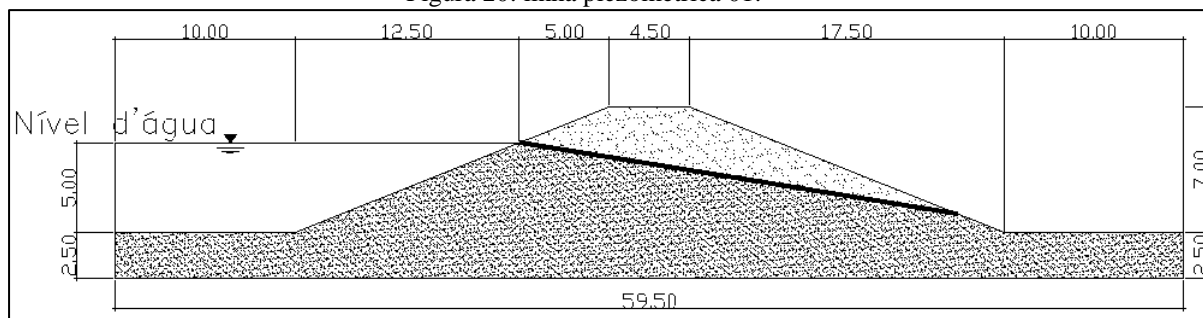
Tabela 16: parâmetros geotécnicos para cálculo do fator de segurança – sexta combinação

Parâmetros Geotécnicos	
γ	15,00 kN/m ³
γ_{sat}	19,44 kN/m ³
c'	20 kPa
ϕ'	24°

Fonte: o autor, 2019

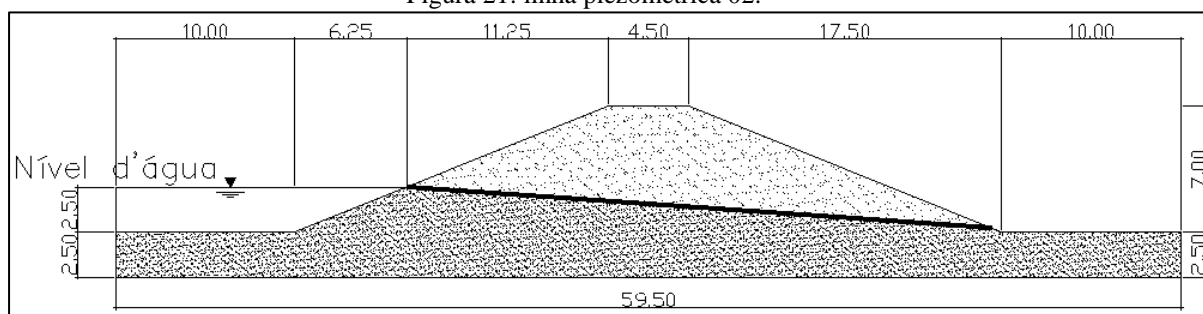
Além das combinações dos parâmetros geotécnicos, o fator de segurança foi calculado com a barragem vazia e, também, com outros três níveis de água sendo cheia com 5,00m de coluna d'água, meio cheia com 2,50m de coluna d'água e com 1/4 de sua capacidade total que caracteriza 1,25m de coluna d'água. Esses níveis de água geraram três linhas piezométricas diferentes, como podem ser vistas nas figuras 20, 21 e 22.

Figura 20: linha piezométrica 01.



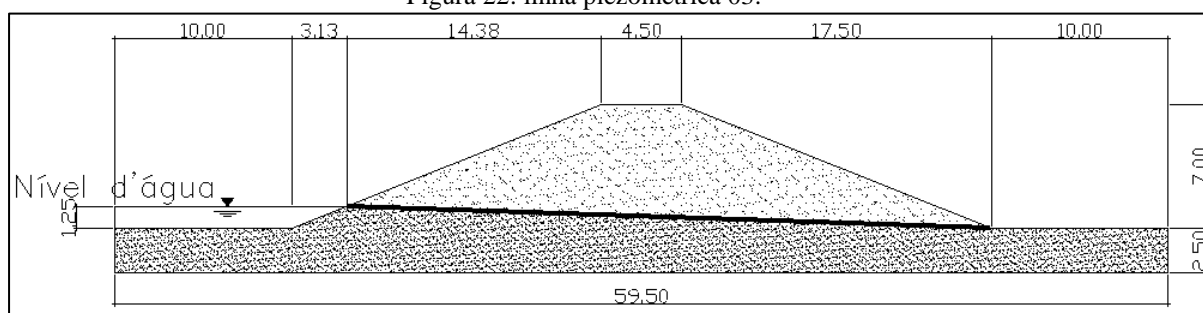
Fonte: o autor, 2019

Figura 21: linha piezométrica 02.



Fonte: o autor, 2019

Figura 22: linha piezométrica 03.



Fonte: o autor, 2019

De acordo com Costa (2015) foi com o mesmo material do maciço que construíram o núcleo impermeável da barragem estudada. Por esse motivo, a barragem foi estudada como sendo uma barragem de solo homogênea.

10.3 Fator de segurança

Assim como é abordado por Pereira (2019), o cálculo do fator de segurança por meio do método comum das fatias, consiste em determinar a superfície de ruptura, subdividir o talude em fatias e retificar a base das mesmas. Em seguida, efetuar o equilíbrio de forças em cada fatia e o equilíbrio do conjunto por meio da equação de equilíbrio de momentos.

Assim sendo, com auxílio do software AutoCAD, o primeiro passo é desenhar a estrutura da barragem, inclusive demarcar a superfície de ruptura, como pode ser visto no Apêndice A.

Posteriormente a superfície de ruptura, deve-se dividir o talude em fatias. Para a análise proposta neste trabalho, todos os taludes analisados foram divididos em 45 fatias. Em seguida, deve-se medir a base retificada das fatias e, também, o ângulo que a base forma com a linha horizontal. Além disso, deve-se medir a altura média e a largura de todas as fatias. No Apêndice A, estão representadas as barragens com suas devidas linhas piezométricas.

Portanto, após mensurar todas as dimensões necessárias para o cálculo do fator de segurança, deve-se aplicar os dados obtidos, com o auxílio do software Excel, nos métodos de Fellenius e Bishop simplificado. Os fatores de segurança obtidos por meio do método de Morgenstern-Price podem ser consultados no Anexo B.

11 CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA

Os fatores de segurança dos três métodos calculados com os parâmetros geotécnicos já estabelecidos no trabalho de conclusão de curso I estão demonstrados no quadro 03. Do mesmo modo, foram calculados os fatores de segurança de todas as variações dos parâmetros geotécnicos apresentados nas tabelas 11, 12, 13, 14, 15 e 16, cujos resultados podem ser vistos nos quadros 04, 05, 06, 07, 08 e 09.

Quadro 03: resultado dos fatores de segurança da primeira análise dos parâmetros geotécnicos

Fator de Segurança (1ª Análise)			
Talude	Fellenius	Bishop Simplificado	Morgenstern-Price
Talude Montante - Barragem Vazia	2,609	2,953	2,672
Talude Jusante - Barragem Vazia	2,568	2,904	2,706
Talude Montante - LP-01	1,622	1,838	3,099
Talude Jusante - LP-01	2,074	2,358	2,304
Talude Montante - LP-02	2,054	2,327	2,624
Talude Jusante - LP-02	2,315	2,620	2,484
Talude Montante - LP-03	2,318	2,626	2,539
Talude Jusante - LP-03	2,375	2,687	2,549

Fonte: o autor, 2019

Quadro 04: resultado dos fatores de segurança da segunda análise dos parâmetros geotécnicos

Fator de Segurança (1ª Combinação)			
Talude	Fellenius	Bishop Simplificado	Morgenstern-Price
Talude Montante - Barragem Vazia	2,012	2,280	2,075
Talude Jusante - Barragem Vazia	2,006	2,274	2,097
Talude Montante - LP-01	1,421	1,820	2,365
Talude Jusante - LP-01	1,614	2,047	1,708
Talude Montante - LP-02	1,675	1,912	2,079
Talude Jusante - LP-02	1,787	2,036	1,923
Talude Montante - LP-03	1,783	2,031	2,000
Talude Jusante - LP-03	1,847	2,105	1,967

Fonte: o autor, 2019

Quadro 05: resultado dos fatores de segurança da terceira análise dos parâmetros geotécnicos

Fator de Segurança (2ª Combinação)			
Talude	Fellenius	Bishop Simplificado	Morgenstern-Price
Talude Montante - Barragem Vazia	3,023	3,416	3,100
Talude Jusante - Barragem Vazia	2,975	3,360	3,154
Talude Montante - LP-01	1,707	2,113	3,274
Talude Jusante - LP-01	2,256	2,805	2,440
Talude Montante - LP-02	2,330	2,626	3,018
Talude Jusante - LP-02	2,666	3,013	2,878
Talude Montante - LP-03	2,682	3,037	2,933
Talude Jusante - LP-03	2,766	3,124	2,959

Fonte: o autor, 2019

Quadro 06: resultado dos fatores de segurança da quarta análise dos parâmetros geotécnicos

Fator de Segurança (3ª Combinação)			
Talude	Fellenius	Bishop Simplificado	Morgenstern-Price
Talude Montante - Barragem Vazia	2,137	2,408	2,202
Talude Jusante - Barragem Vazia	2,101	2,366	2,242
Talude Montante - LP-01	1,172	1,432	2,283
Talude Jusante - LP-01	1,608	1,995	1,724
Talude Montante - LP-02	1,743	1,968	2,131
Talude Jusante - LP-02	1,885	2,125	2,044
Talude Montante - LP-03	1,885	2,125	2,072
Talude Jusante - LP-03	1,939	2,185	2,100

Fonte: o autor, 2019

Quadro 07: resultado dos fatores de segurança da quinta análise dos parâmetros geotécnicos

Fator de Segurança (4ª Combinação)			
Talude	Fellenius	Bishop Simplificado	Morgenstern-Price
Talude Montante - Barragem Vazia	4,207	4,787	4,361
Talude Jusante - Barragem Vazia	4,324	5,223	4,411
Talude Montante - LP-01	3,232	4,187	5,209
Talude Jusante - LP-01	3,549	4,558	3,739
Talude Montante - LP-02	3,623	4,152	4,441
Talude Jusante - LP-02	3,869	4,427	4,097
Talude Montante - LP-03	3,811	4,359	4,231
Talude Jusante - LP-03	3,972	4,547	4,192

Fonte: o autor, 2019

Quadro 08: resultado dos fatores de segurança da sexta análise dos parâmetros geotécnicos

Fator de Segurança (5ª Combinação)			
Talude	Fellenius	Bishop Simplificado	Morgenstern-Price
Talude Montante - Barragem Vazia	3,622	4,122	3,740
Talude Jusante - Barragem Vazia	3,660	4,167	3,809
Talude Montante - LP-01	2,721	3,362	4,478
Talude Jusante - LP-01	2,262	2,858	2,729
Talude Montante - LP-02	2,472	2,798	4,009
Talude Jusante - LP-02	2,799	3,159	3,393
Talude Montante - LP-03	3,124	3,534	3,752
Talude Jusante - LP-03	3,071	3,468	3,571

Fonte: o autor, 2019

Quadro 09: resultado dos fatores de segurança da sétima análise dos parâmetros geotécnicos

Fator de Segurança (6ª Combinação)			
Talude	Fellenius	Bishop Simplificado	Morgenstern-Price
Talude Montante - Barragem Vazia	2,922	3,314	3,021
Talude Jusante - Barragem Vazia	2,929	3,319	3,063
Talude Montante - LP-01	1,433	1,785	3,327
Talude Jusante - LP-01	2,067	2,595	2,354
Talude Montante - LP-02	2,233	2,523	3,076
Talude Jusante - LP-02	2,478	2,796	2,807
Talude Montante - LP-03	2,625	2,967	2,954
Talude Jusante - LP-03	2,612	2,950	2,895

Fonte: o autor, 2019

12 DISCUSSÃO E RESULTADOS

A barragem apresentada no estudo de caso, não teve a realização de ensaio SPT e sua estabilidade foi desenvolvida, basicamente, em torno de sua geometria, sem análise ao fator de segurança. Foi desenvolvida para substituir outra barragem que se rompeu por falta de acompanhamento técnico.

Para tornar possível a verificação do fator de segurança, foi preciso correlacionar os parâmetros geotécnicos sendo eles o peso específico, coesão e ângulo de atrito, necessários na utilização dos métodos de estabilidade, são eles: Fellenius, Bishop simplificado e Morgenstern-Price.

O fator de segurança é imprescindível e deve ser verificado sempre, pois é nessa análise, enquanto projeto, que muitos problemas, inclusive estruturais, são evitados, pois há a flexibilidade de ajuste da geometria da barragem para que o fator de segurança esteja de acordo com o que é determinado por norma.

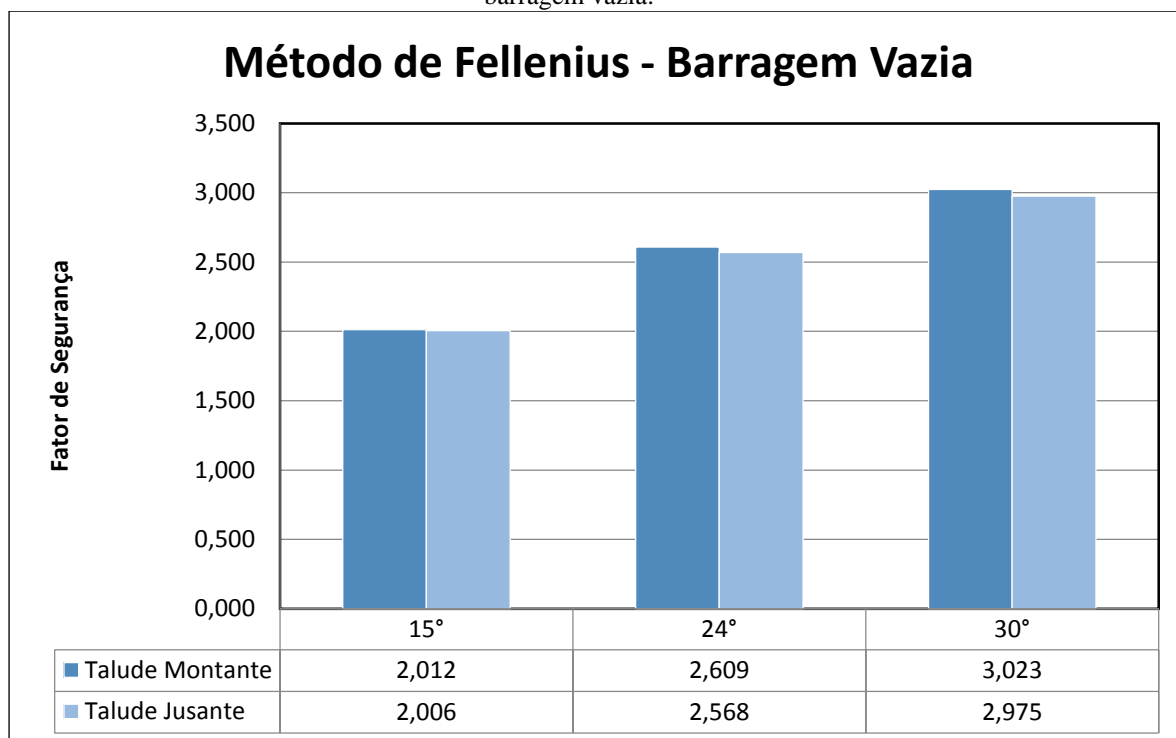
12.1 Resultados

A priori, os resultados obtidos, com os parâmetros apresentados na tabela 10, foram satisfatórios, uma vez que atenderam o fator de segurança mínimo estabelecido por norma. Porém, houve casos onde o talude montante com análise de linha piezométrica 01, apresentou certa discrepância entre os métodos de Fellenius, Bishop simplificado e Morgenstern-Price.

Essa discrepância ocorreu, devido à complexidade dos métodos estudados neste trabalho. Os métodos de Fellenius e Bishop simplificado são fáceis de serem executados sem o auxílio de um computador. Entretanto, o método de Morgenstern-Price, exige cálculo computacional derivado do complexo processo iterativo, além de seu cálculo envolver muitas variáveis. Assim sendo, os métodos Fellenius e Bishop simplificado são menos precisos do que o método de Morgenstern-Price, por esse motivo, pode ocorrer diferenças de resultados entre os métodos.

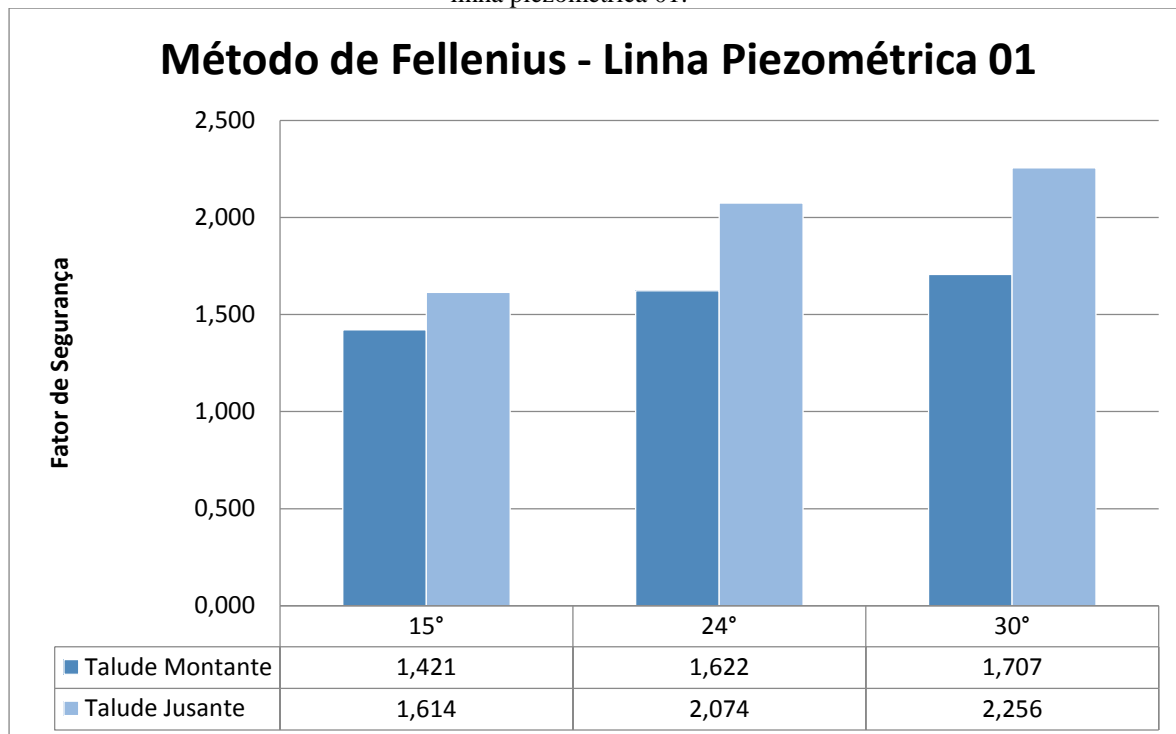
Diante disso foram realizadas outras seis análises com intuito de estudar a geometria da barragem com outros parâmetros geotécnicos. Assim sendo, os gráficos 01, 02, 03 e 04 mostram os fatores de segurança, dos taludes, montante e jusante, com as três variações do ângulo de atrito por meio do método de Fellenius, quando a barragem está vazia, com a linha piezométrica 01, linha piezometria 02 e linha piezométrica 03 respectivamente, as linhas piezométricas podem ser consultadas na devida ordem das figuras 20, 21 e 22.

Gráfico 01: fator de segurança por meio do método de Fellenius em função da variação do ângulo de atrito – barragem vazia.



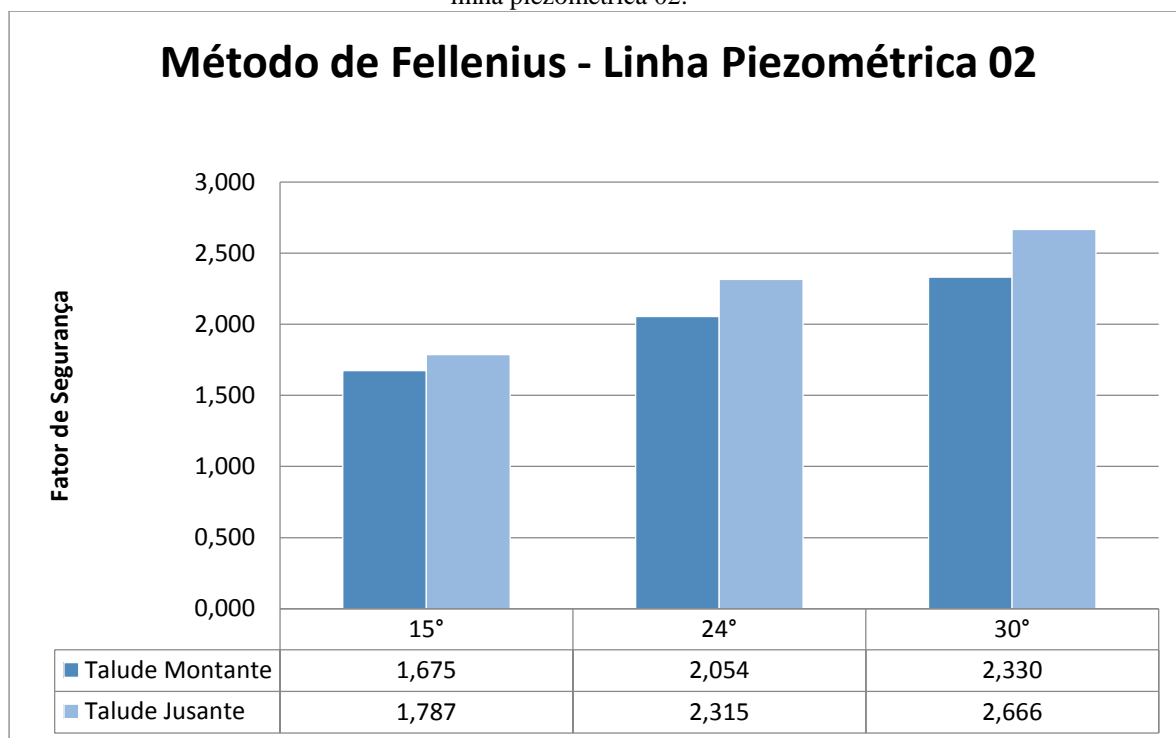
Fonte: o autor, 2019

Gráfico 02: fator de segurança por meio do método de Fellenius em função da variação do ângulo de atrito – linha piezométrica 01.



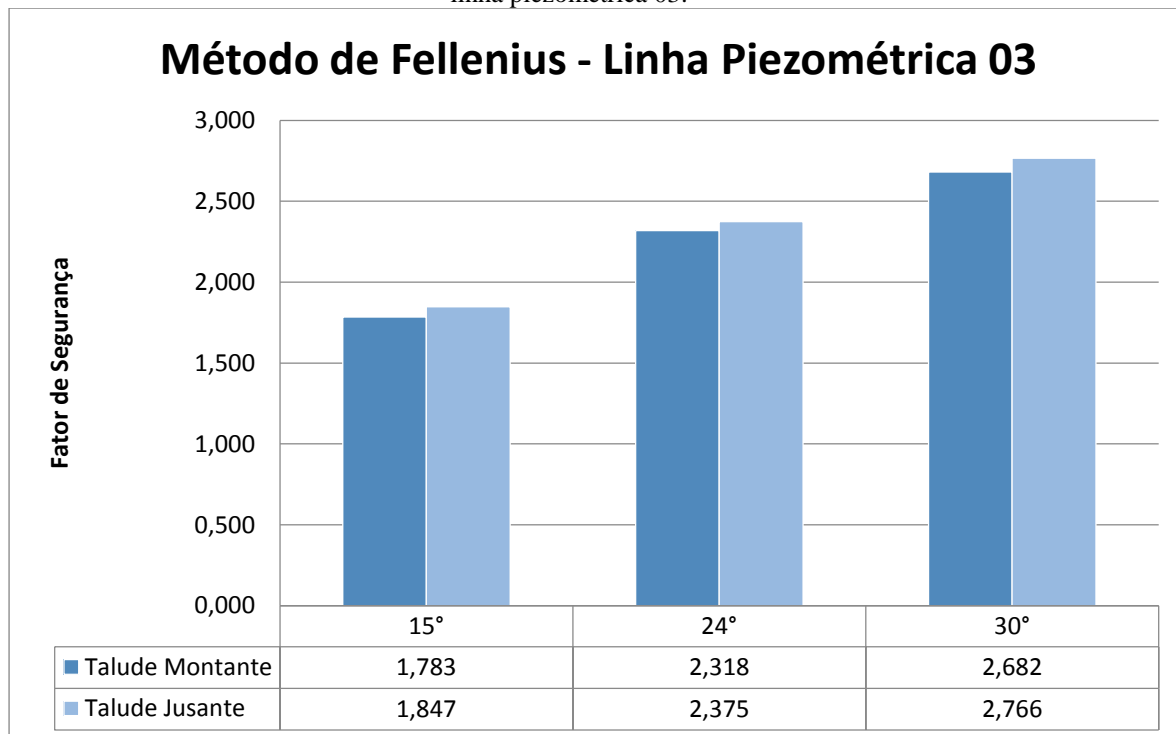
Fonte: o autor, 2019

Gráfico 03: fator de segurança por meio do método de Fellenius em função da variação do ângulo de atrito – linha piezométrica 02.



Fonte: o autor, 2019

Gráfico 04: fator de segurança por meio do método de Fellenius em função da variação do ângulo de atrito – linha piezométrica 03.

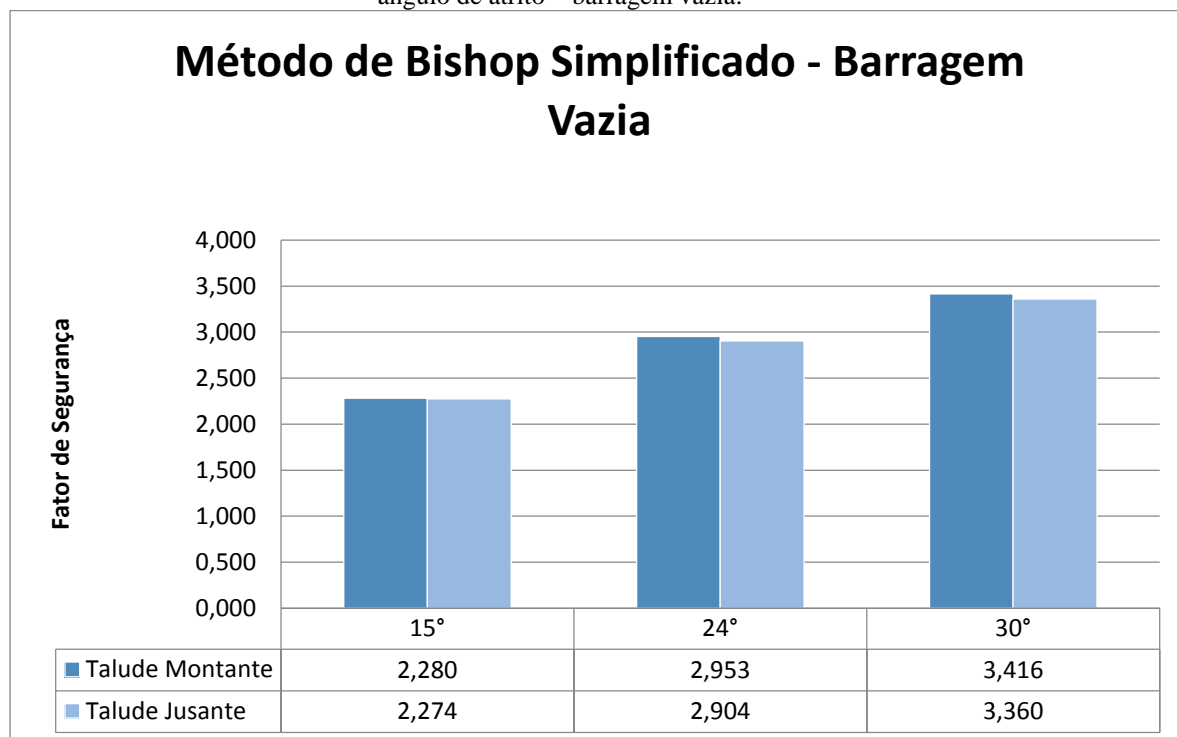


Fonte: o autor, 2019

Já os gráficos 05, 06, 07 e 08 mostram os fatores de segurança, dos taludes, montante e jusante, com as três variações do ângulo de atrito por meio do método de Bishop

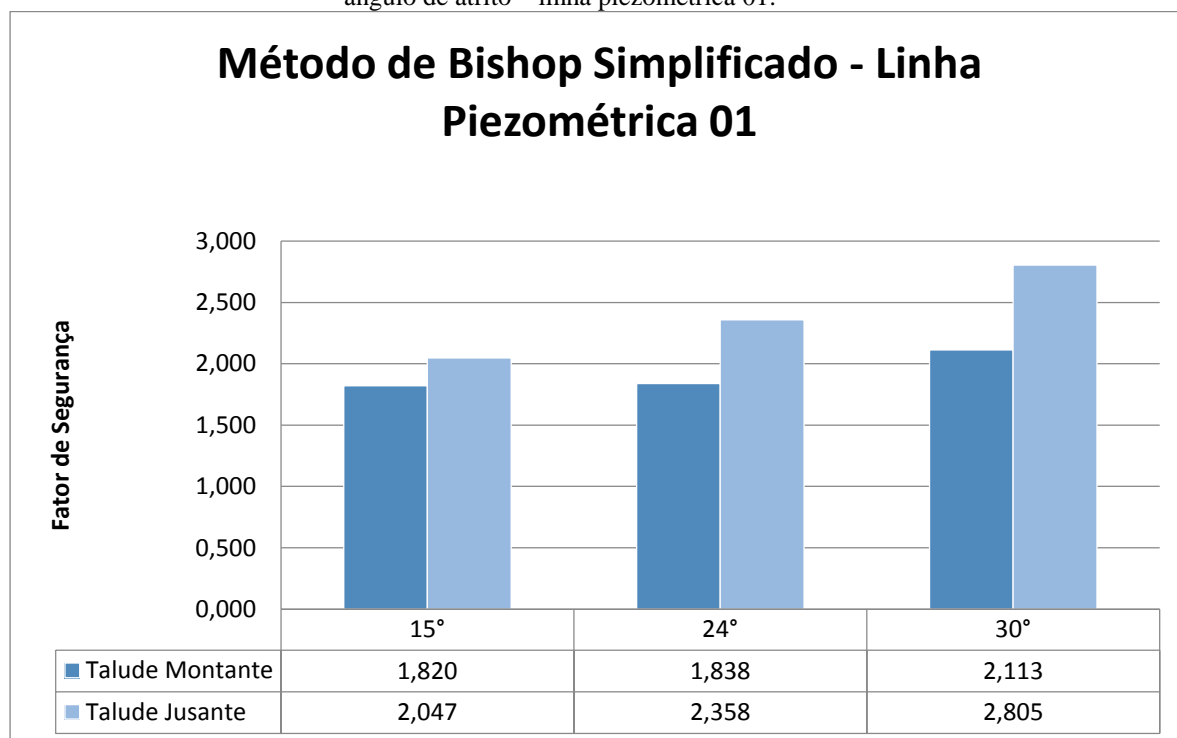
simplificado, quando a barragem está vazia, com a linha piezométrica 01, linha piezometria 02 e linha piezométrica 03 respectivamente.

Gráfico 05: fator de segurança por meio do método de Bishop simplificado em função da variação do ângulo de atrito – barragem vazia.



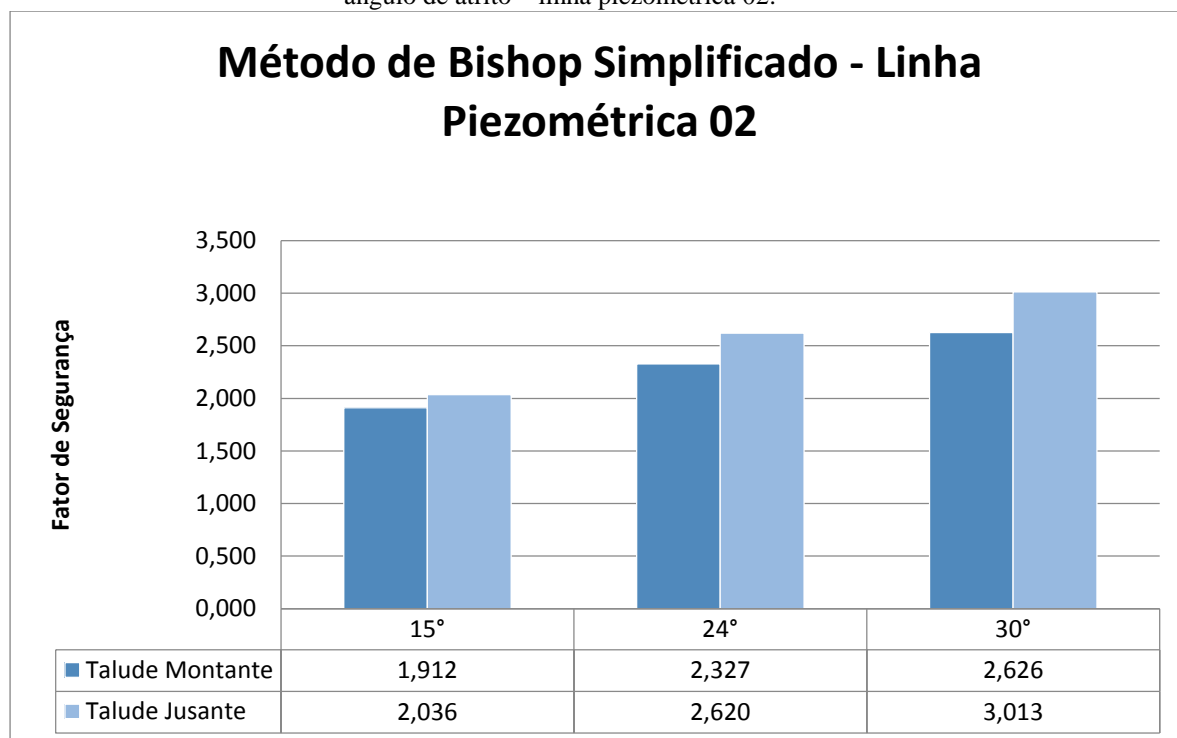
Fonte: o autor, 2019

Gráfico 06: fator de segurança por meio do método de Bishop simplificado em função da variação do ângulo de atrito – linha piezométrica 01.



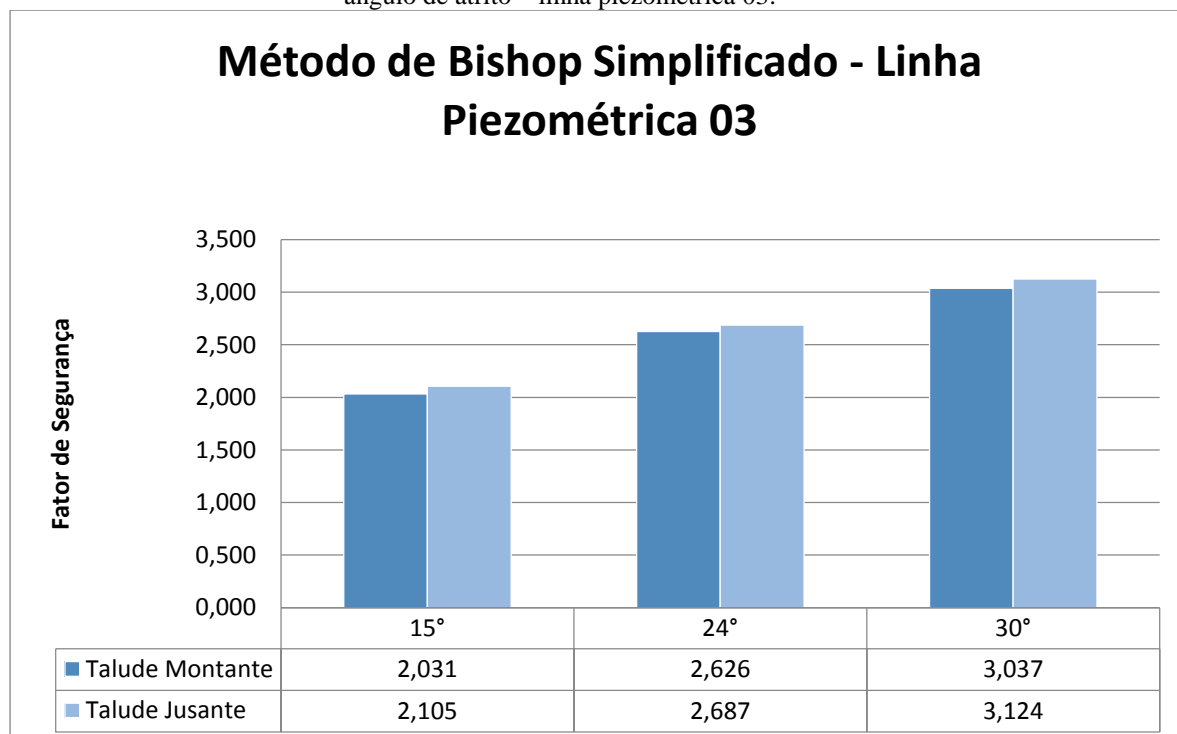
Fonte: o autor, 2019

Gráfico 07: fator de segurança por meio do método de Bishop simplificado em função da variação do ângulo de atrito – linha piezométrica 02.



Fonte: o autor, 2019

Gráfico 08: fator de segurança por meio do método de Bishop simplificado em função da variação do ângulo de atrito – linha piezométrica 03.

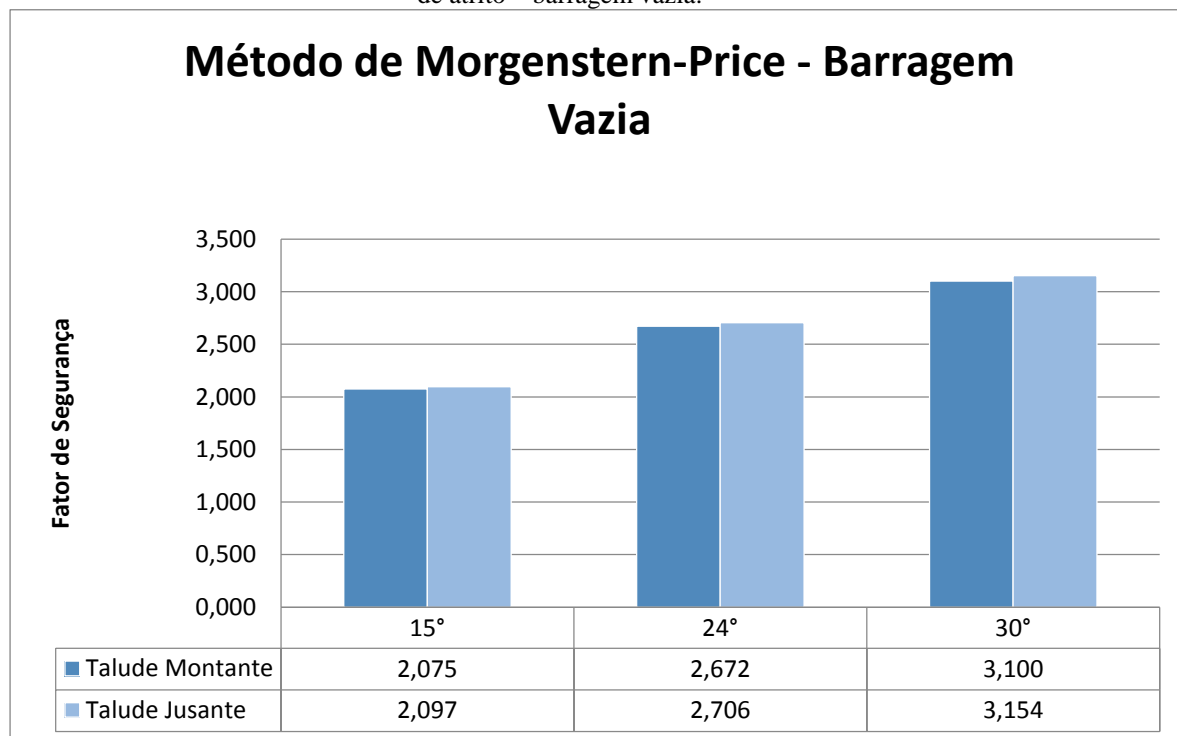


Fonte: o autor, 2019

E ainda, os gráficos 09, 10, 11 e 12 mostram os fatores de segurança, dos taludes, montante e jusante, com as três variações do ângulo de atrito por meio do método de

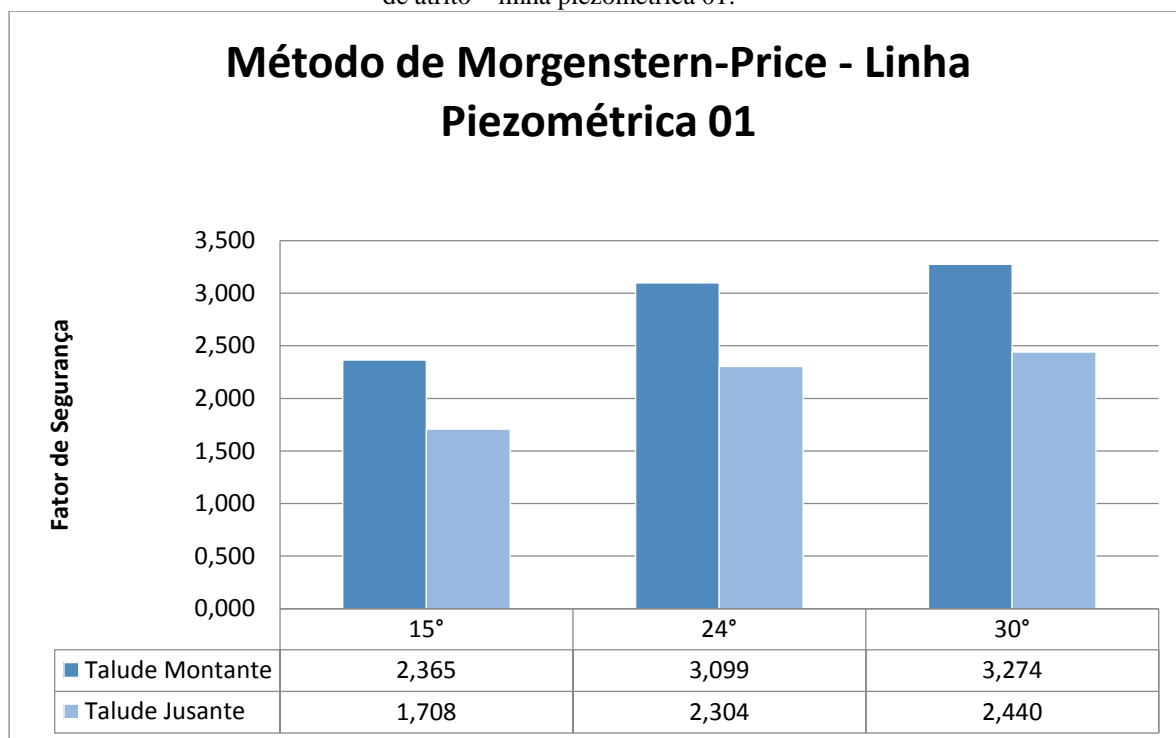
Morgenstern-Price, quando a barragem está vazia, com a linha piezométrica 01, linha piezometria 02 e linha piezométrica 03 respectivamente.

Gráfico 09: fator de segurança por meio do método de Morgenstern-Price em função da variação do ângulo de atrito – barragem vazia.



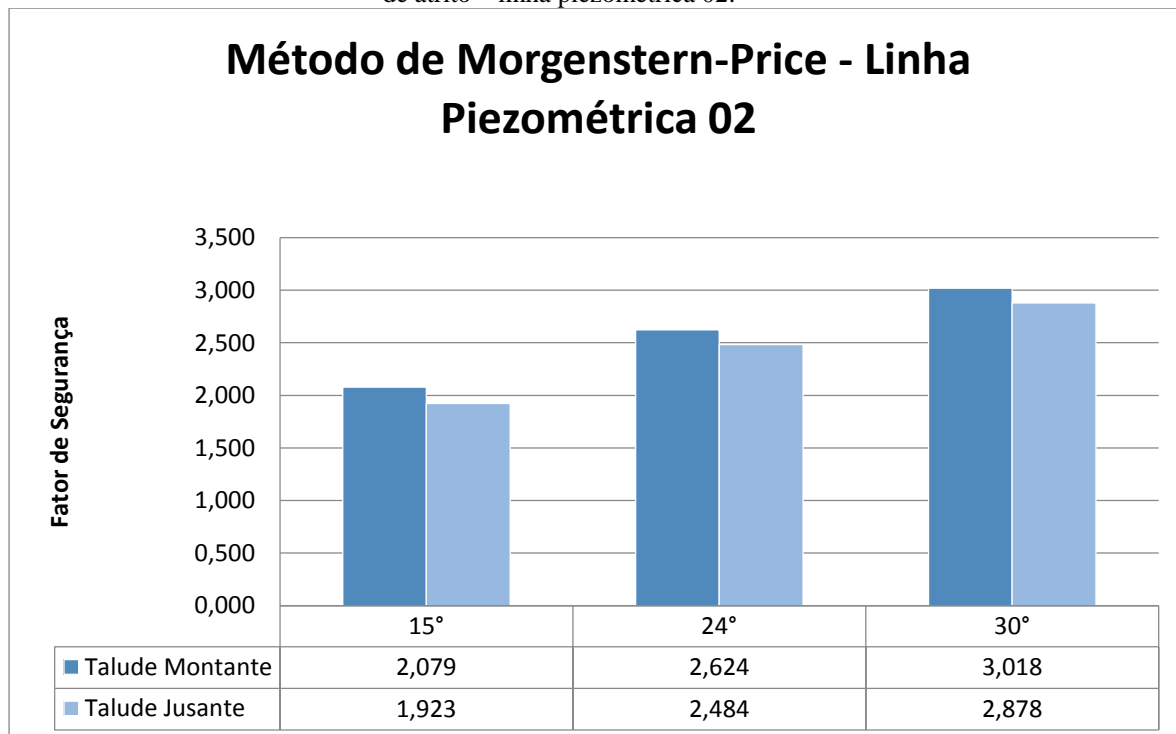
Fonte: o autor, 2019

Gráfico 10: fator de segurança por meio do método de Morgenstern-Price em função da variação do ângulo de atrito – linha piezométrica 01.



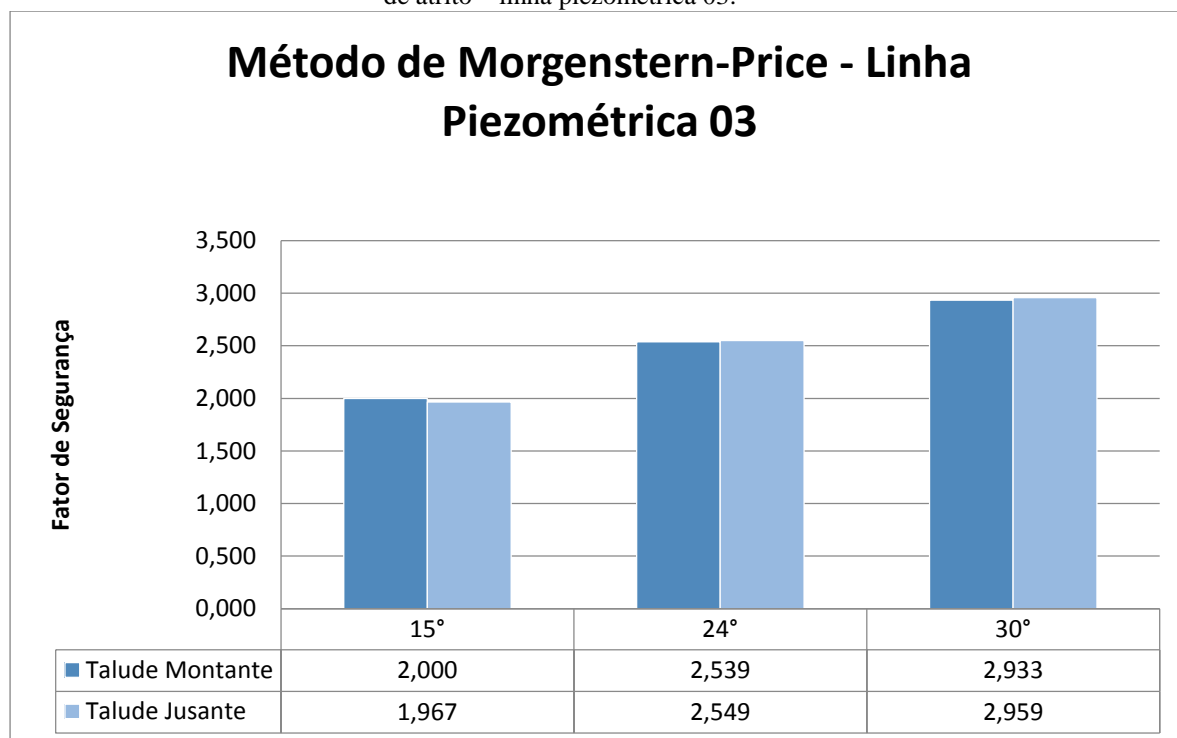
Fonte: o autor, 2019

Gráfico 11: fator de segurança por meio do método de Morgenstern-Price em função da variação do ângulo de atrito – linha piezométrica 02.



Fonte: o autor, 2019

Gráfico 12: fator de segurança por meio do método de Morgenstern-Price em função da variação do ângulo de atrito – linha piezométrica 03.



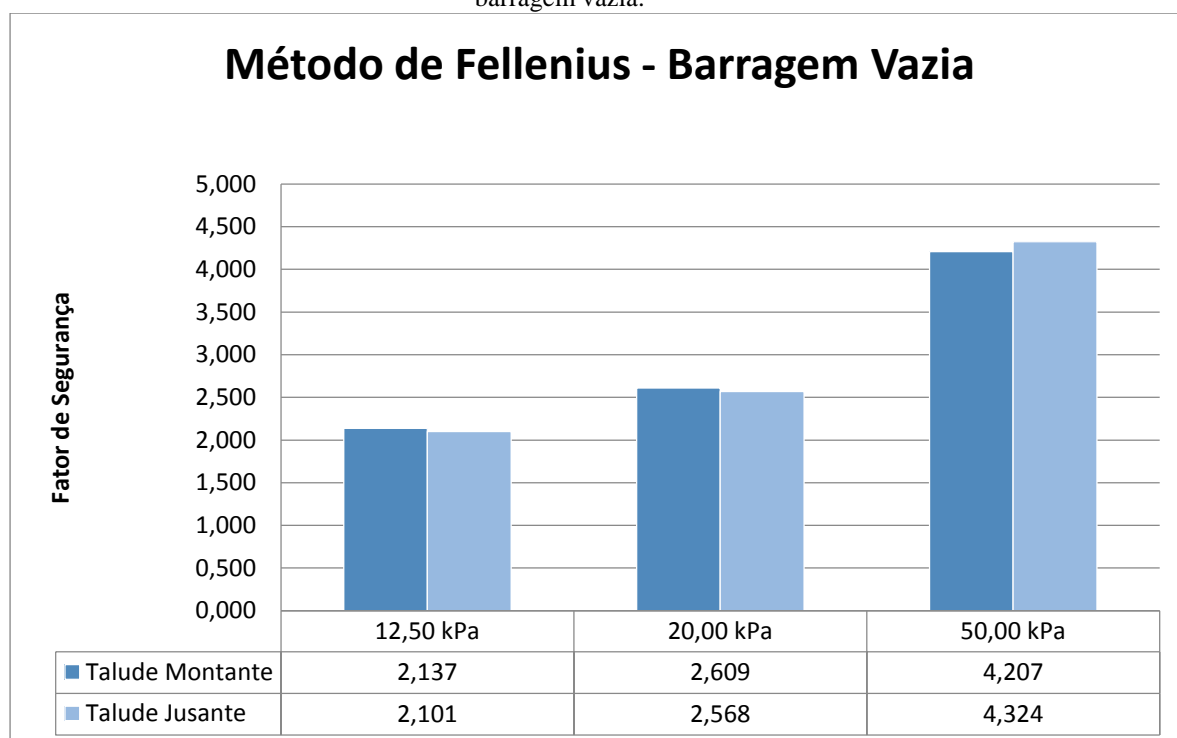
Fonte: o autor, 2019

Como é perceptível, quanto maior for o ângulo de atrito, maior será o fator de segurança. Isso acontece porque, segundo Pinto (2006), o ângulo de atrito é o ângulo máximo que a força transmitida pelos grãos do solo pode fazer com a normal ao plano de contato sem ocorrer deslizamentos, ou seja, é o ângulo formado pela resultante da resistência ao deslizamento com a força normal aplicada.

Logo, quanto maior o ângulo de atrito, menor será o risco de deslizamento. Com isso, é possível observar que os fatores de segurança aumentaram devido ao aumento do valor do ângulo de atrito, como é visto nos gráficos: 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10, 11 e 12.

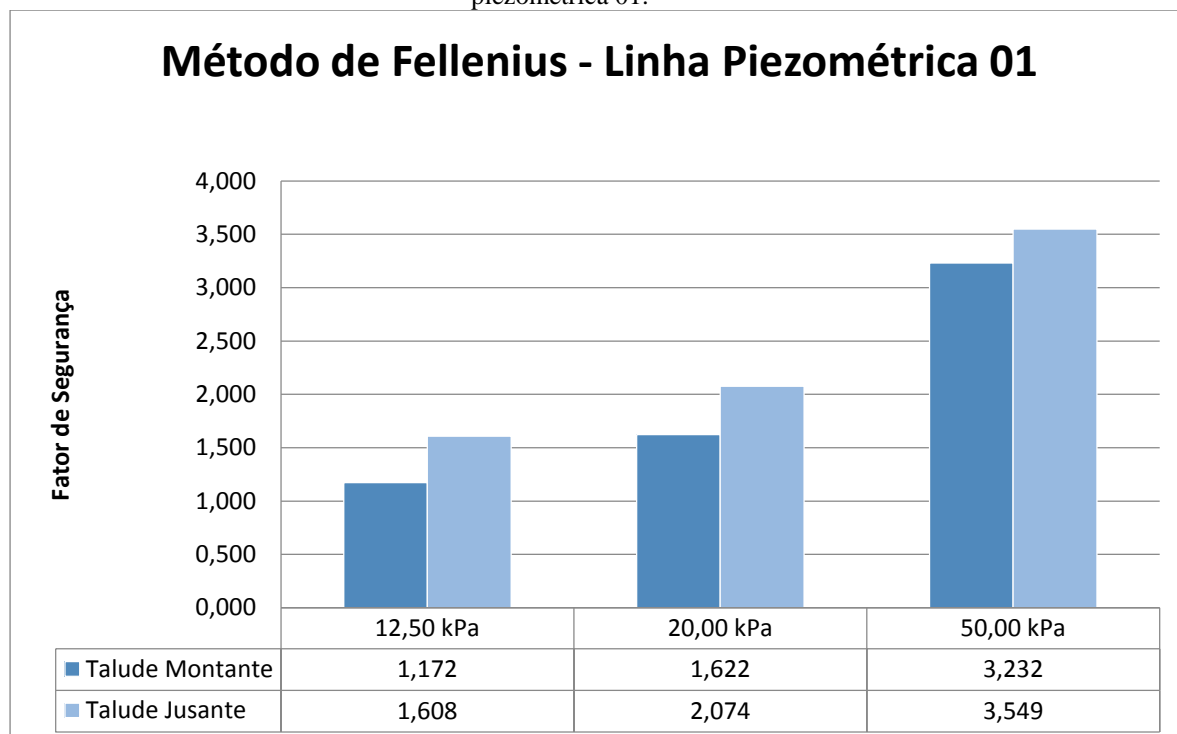
Outra análise realizada foi a variação da coesão. Os gráficos 13, 14, 15 e 16 mostram os fatores de segurança, dos taludes, montante e jusante, com as três variações da coesão por meio do método de Fellenius, quando a barragem está vazia, com a linha piezométrica 01, linha piezometria 02 e linha piezométrica 03 respectivamente.

Gráfico 13: fator de segurança por meio do método de Fellenius em função da variação da coesão – barragem vazia.



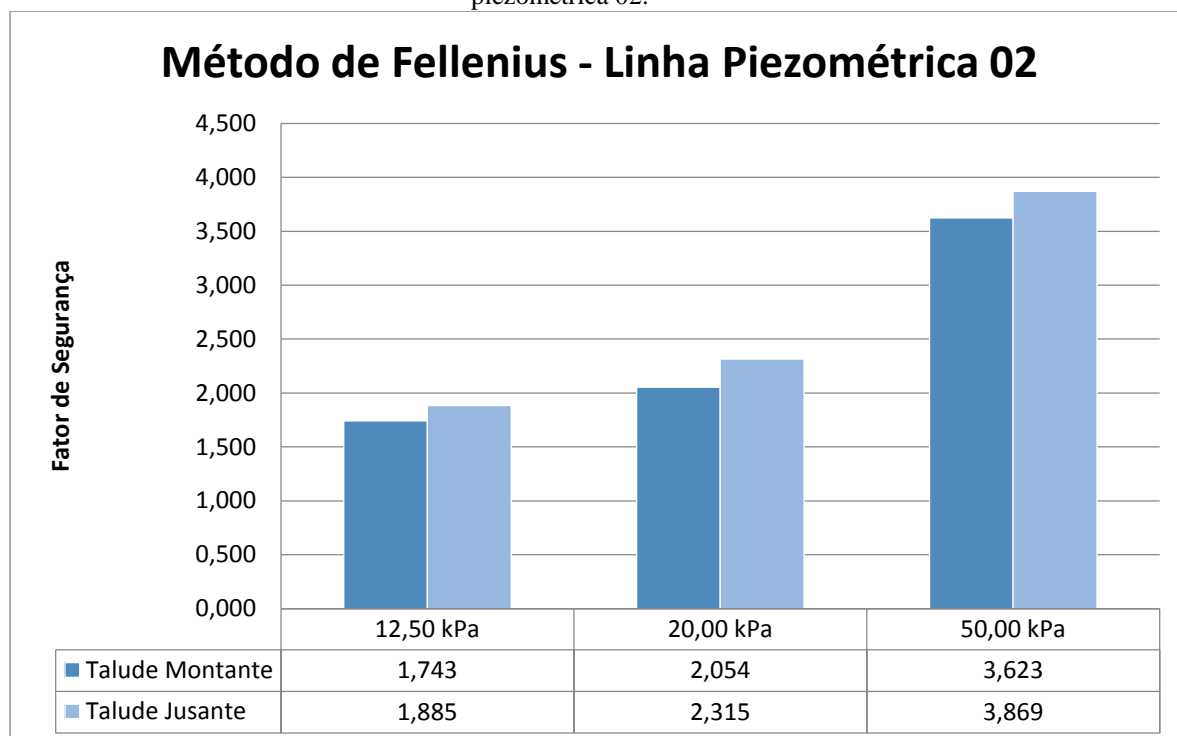
Fonte: o autor, 2019

Gráfico 14: fator de segurança por meio do método de Fellenius em função da variação da coesão – linha piezométrica 01.



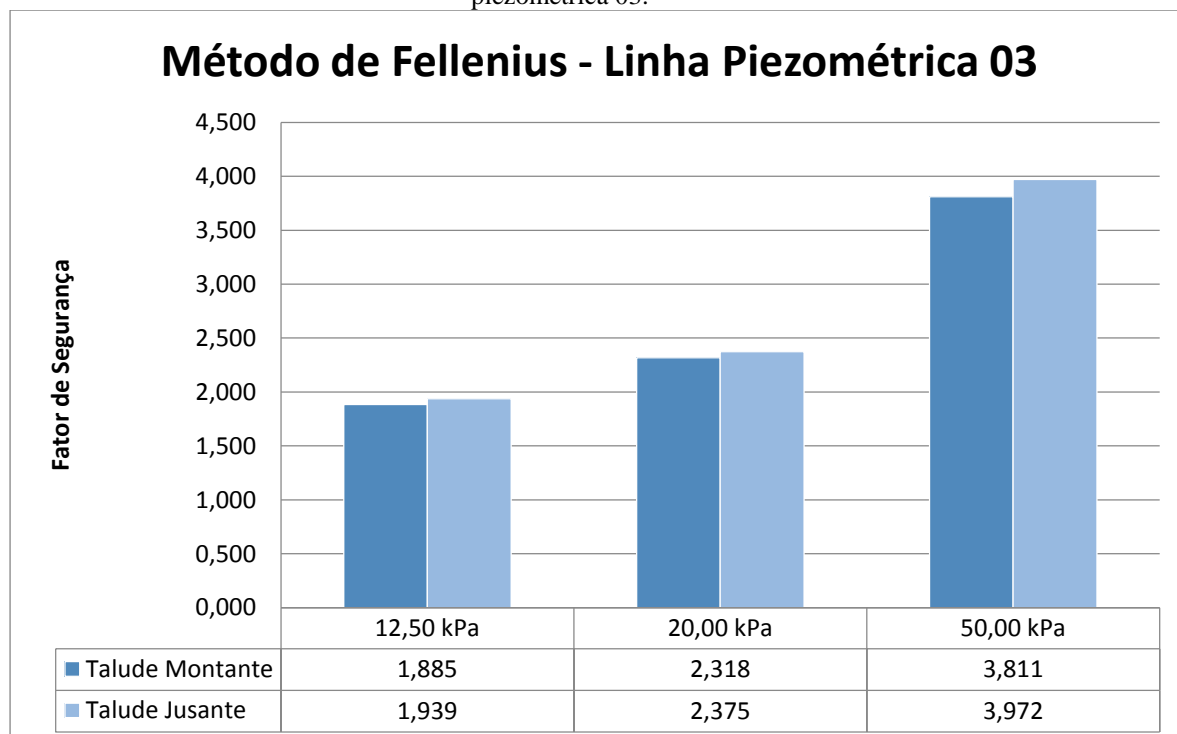
Fonte: o autor, 2019

Gráfico 15: fator de segurança por meio do método de Fellenius em função da variação da coesão – linha piezométrica 02.



Fonte: o autor, 2019

Gráfico 16: fator de segurança por meio do método de Fellenius em função da variação da coesão – linha piezométrica 03.

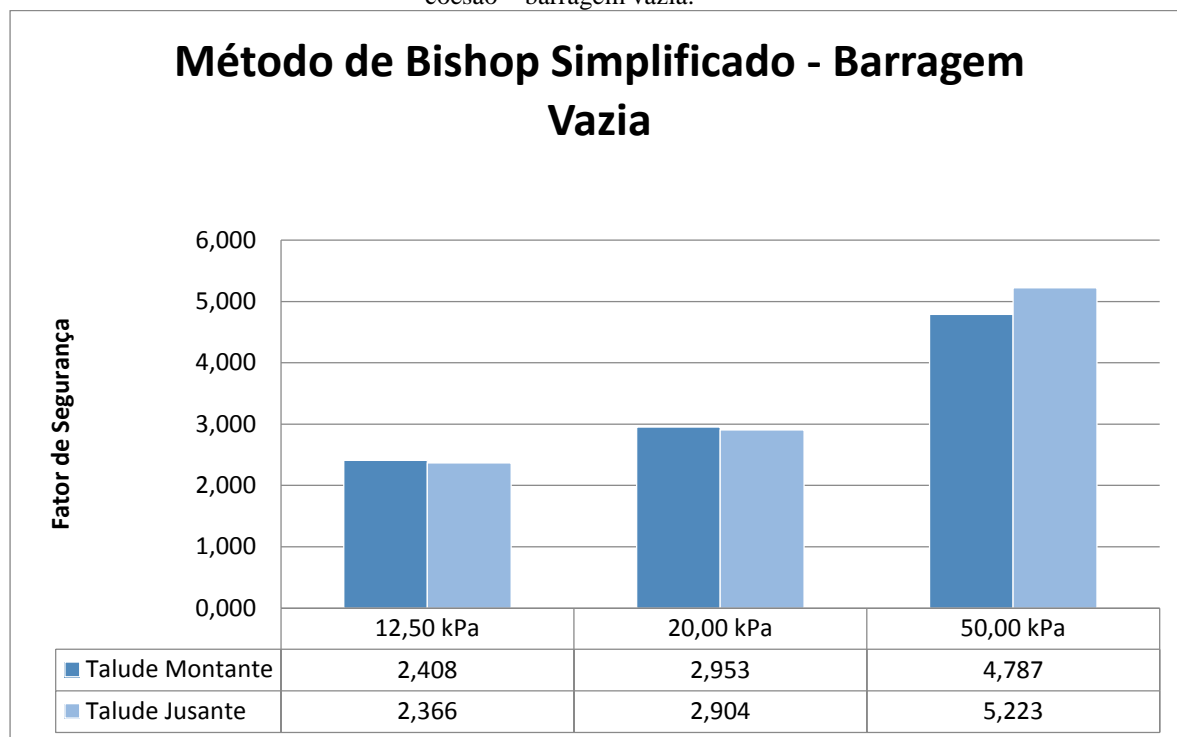


Fonte: o autor, 2019

Ainda, os gráficos 17, 18, 19 e 20 mostram os fatores de segurança, dos taludes, montante e jusante, com as três variações da coesão por meio do método de Bishop

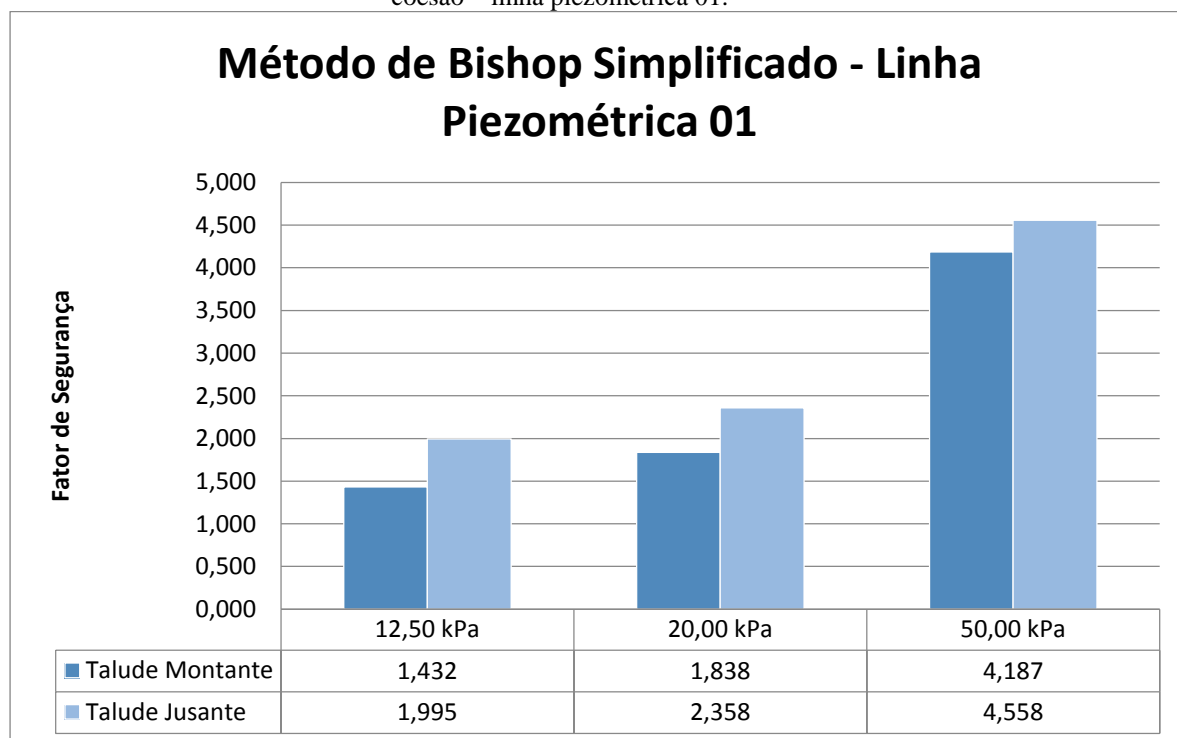
simplificado, quando a barragem está vazia, com a linha piezométrica 01, linha piezometria 02 e linha piezométrica 03 respectivamente.

Gráfico 17: fator de segurança por meio do método de Bishop simplificado em função da variação da coesão – barragem vazia.



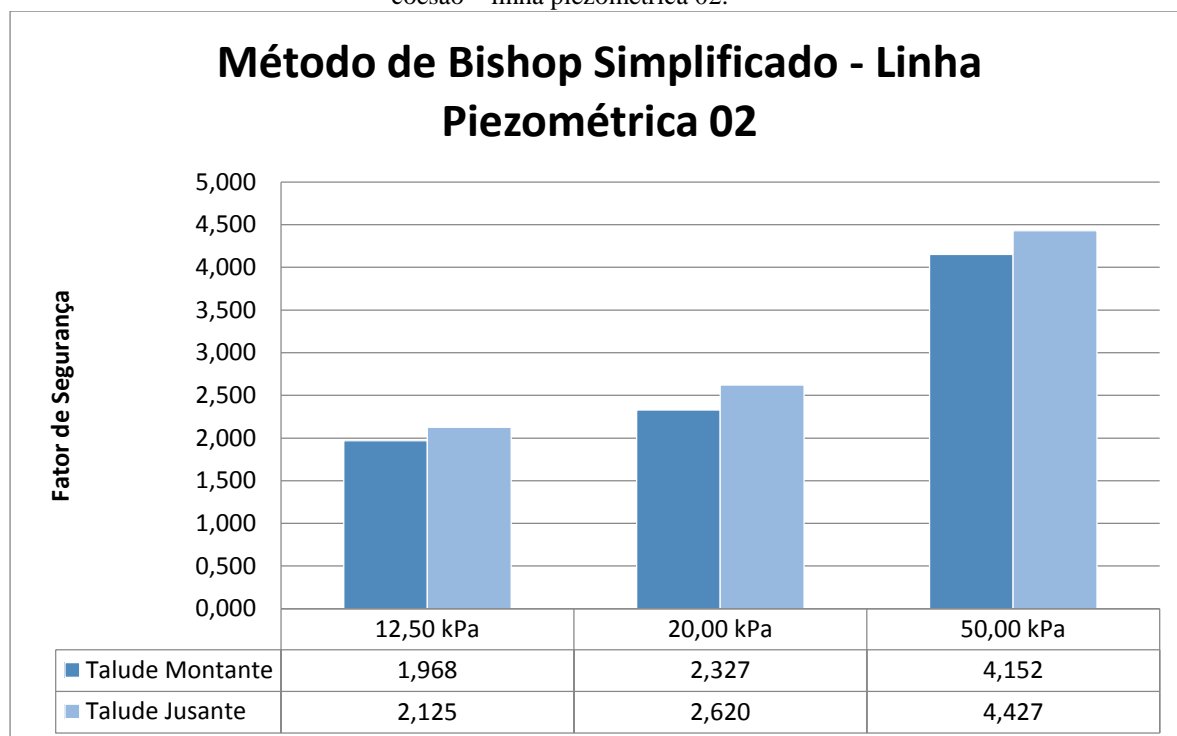
Fonte: o autor, 2019

Gráfico 18: fator de segurança por meio do método de Bishop simplificado em função da variação da coesão – linha piezométrica 01.



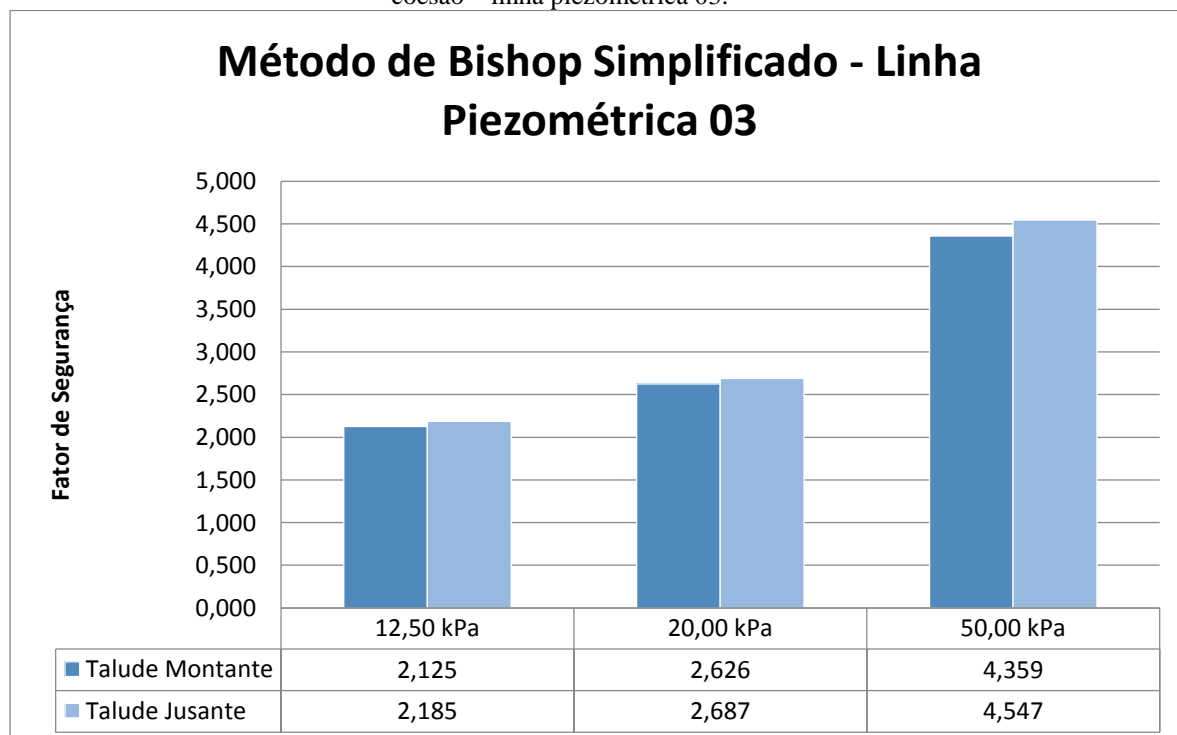
Fonte: o autor, 2019

Gráfico 19: fator de segurança por meio do método de Bishop simplificado em função da variação da coesão – linha piezométrica 02.



Fonte: o autor, 2019

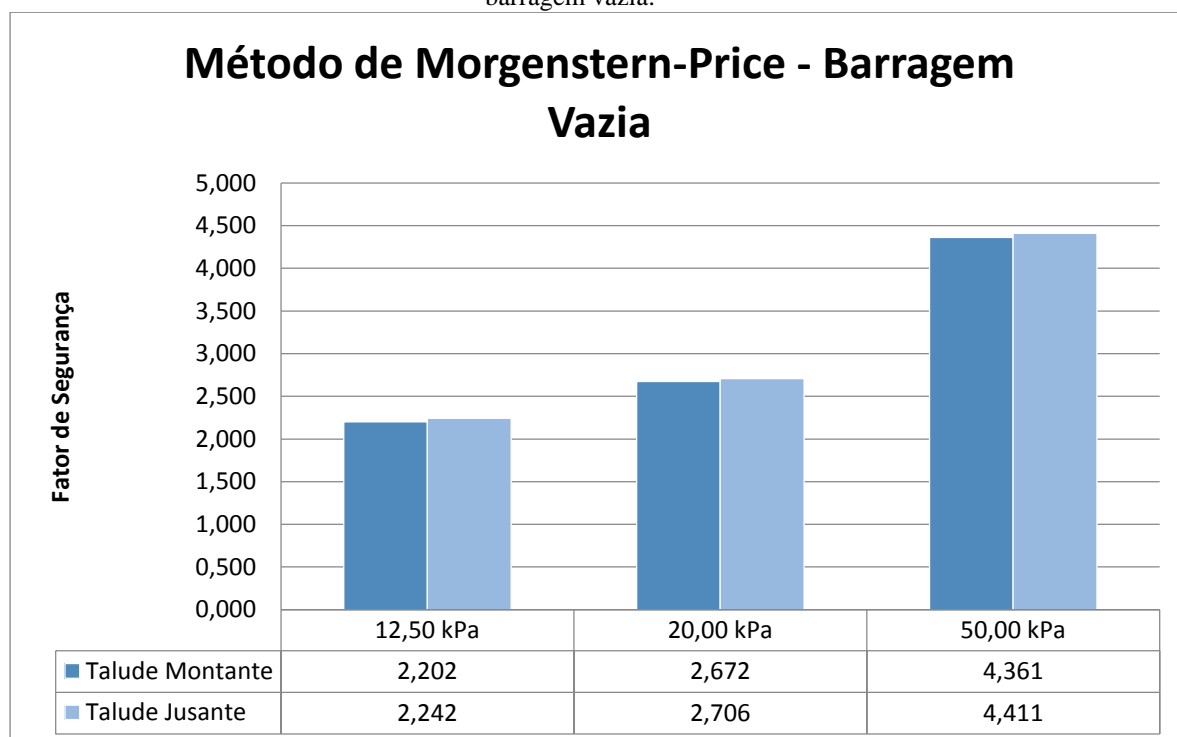
Gráfico 20: fator de segurança por meio do método de Bishop simplificado em função da variação da coesão – linha piezométrica 03.



Fonte: o autor, 2019

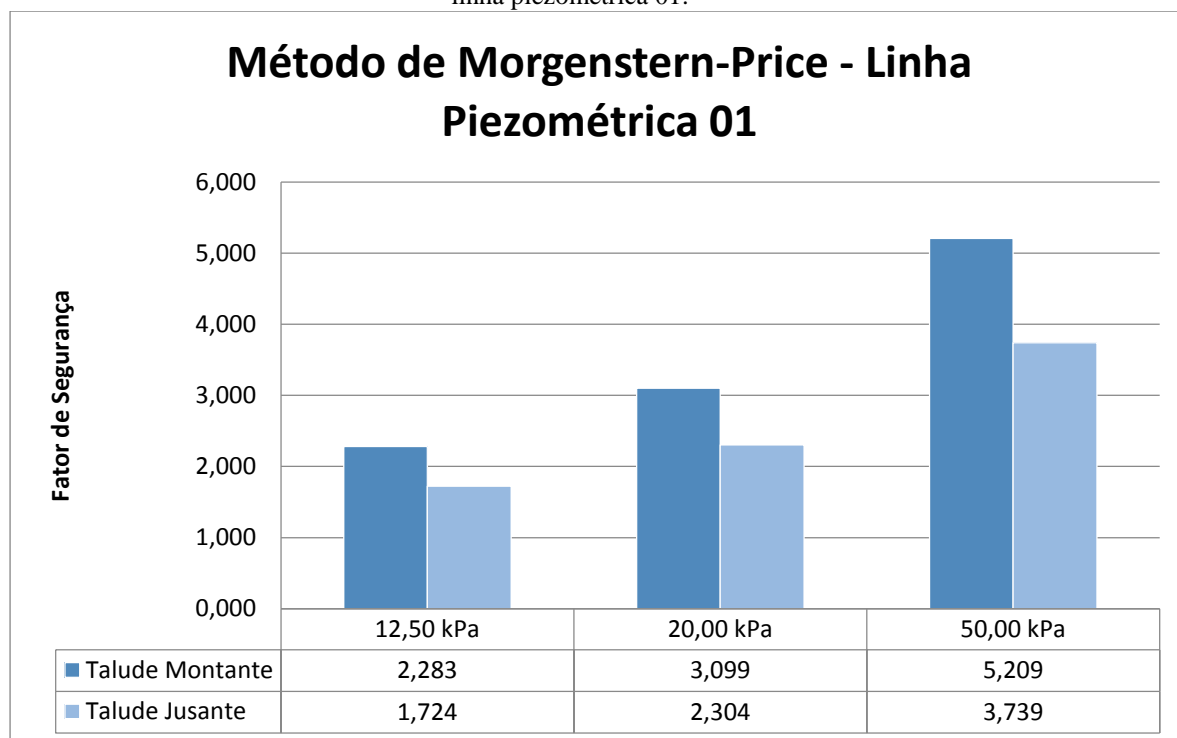
E ainda, os gráficos 21, 22, 23 e 24 mostram os fatores de segurança, dos taludes, montante e jusante, com as três variações da coesão por meio do método de Morgenstern-Price, quando a barragem está vazia, com a linha piezométrica 01, linha piezometria 02 e linha piezométrica 03 respectivamente.

Gráfico 21: fator de segurança por meio do método de Morgenstern-Price em função da variação da coesão – barragem vazia.



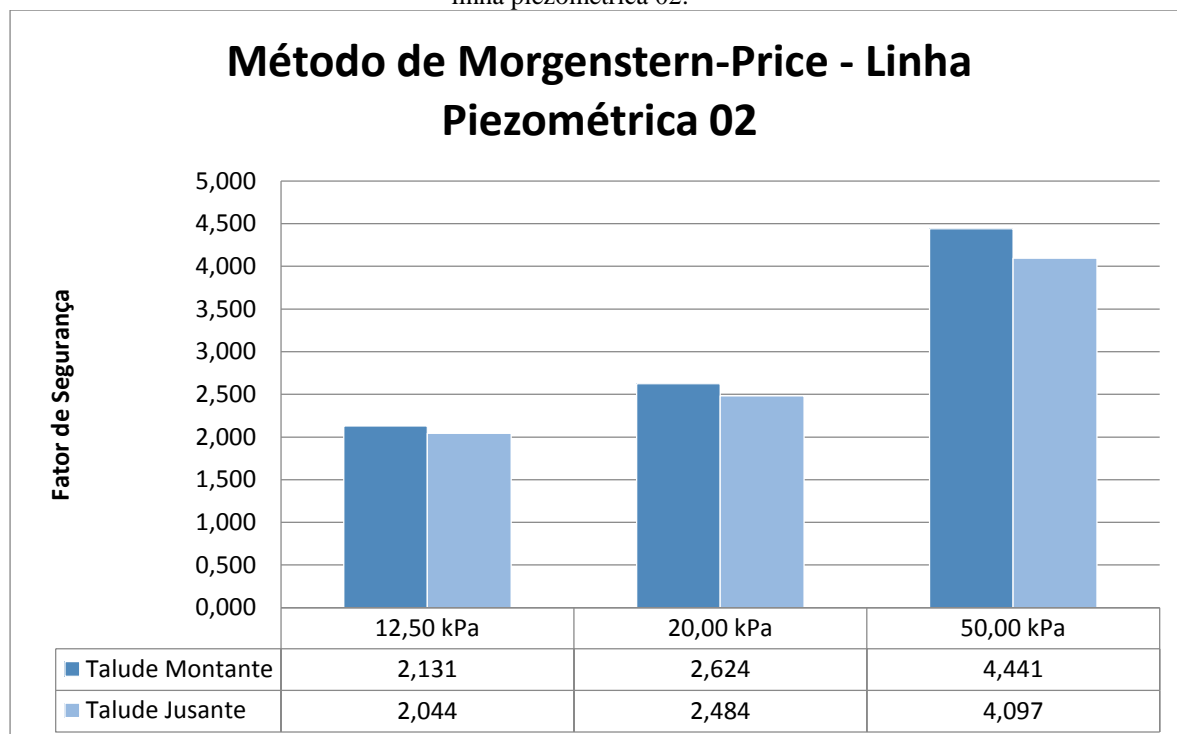
Fonte: o autor, 2019

Gráfico 22: fator de segurança por meio do método de Morgenstern-Price em função da variação da coesão – linha piezométrica 01.



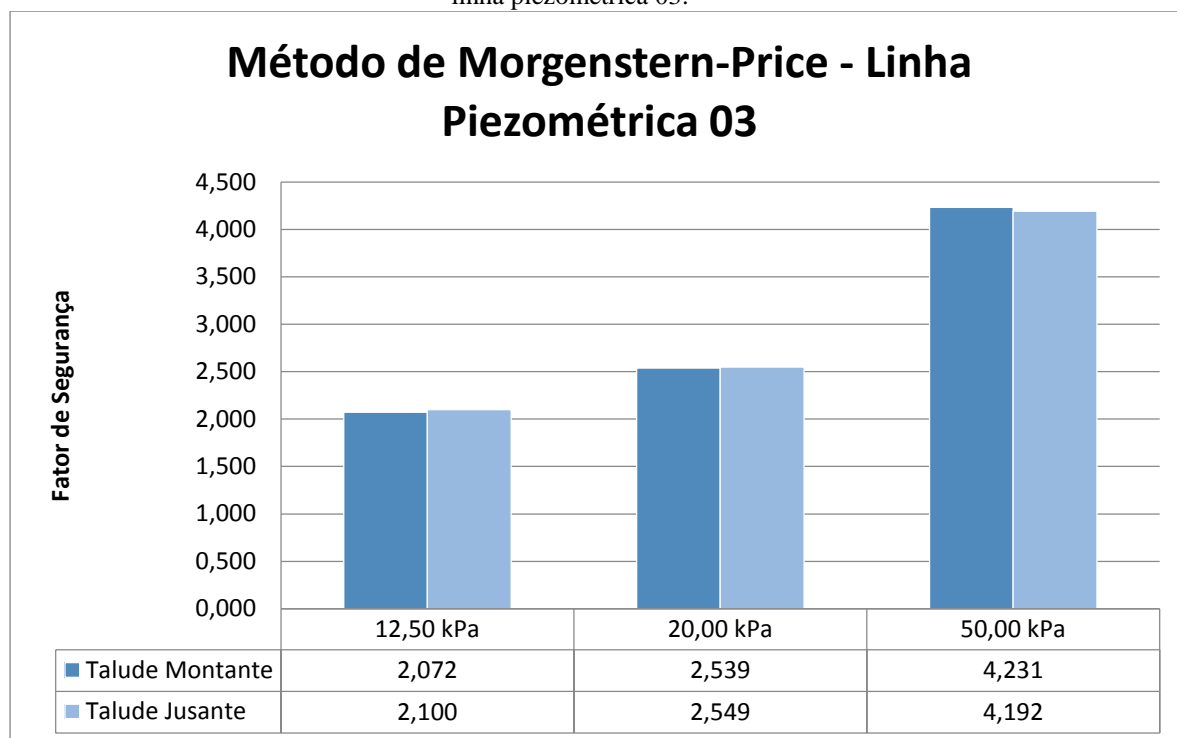
Fonte: o autor, 2019

Gráfico 23: fator de segurança por meio do método de Morgenstern-Price em função da variação da coesão – linha piezométrica 02.



Fonte: o autor, 2019

Gráfico 24: fator de segurança por meio do método de Morgenstern-Price em função da variação da coesão – linha piezométrica 03.



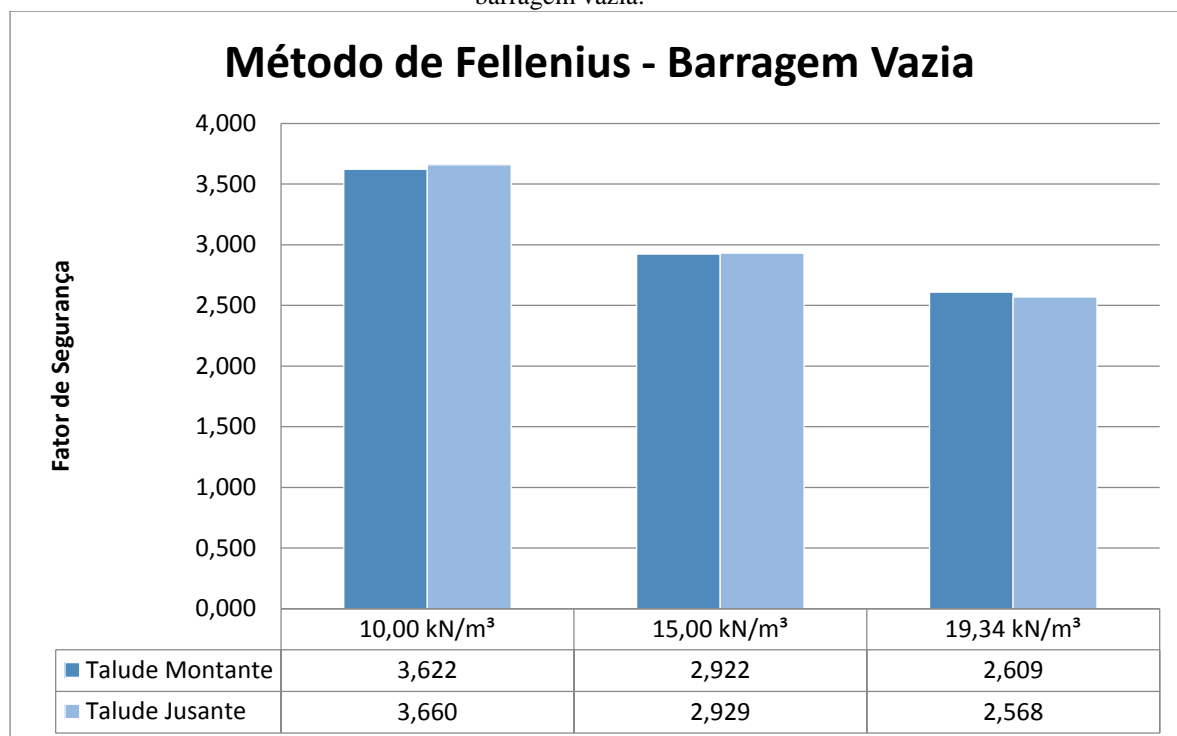
Fonte: o autor, 2019

A coesão, assim como o ângulo de atrito, aumenta o fator de segurança a partir do momento em que seu valor é aumentado. De acordo com Pinto (2006), coesão é a resistência aos esforços de cisalhamento do solo, o solo coesivo pode ser cortado em formas diversas e manter a forma original, é como se uma cola tivesse sido aplicada entre os grãos do solo.

Isso significa que quanto maior a coesão, maior será a resistência ao cisalhamento. Por esse motivo, os fatores de segurança aumentaram devido ao acréscimo do valor da coesão, como foi visto nos gráficos: 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 e 24.

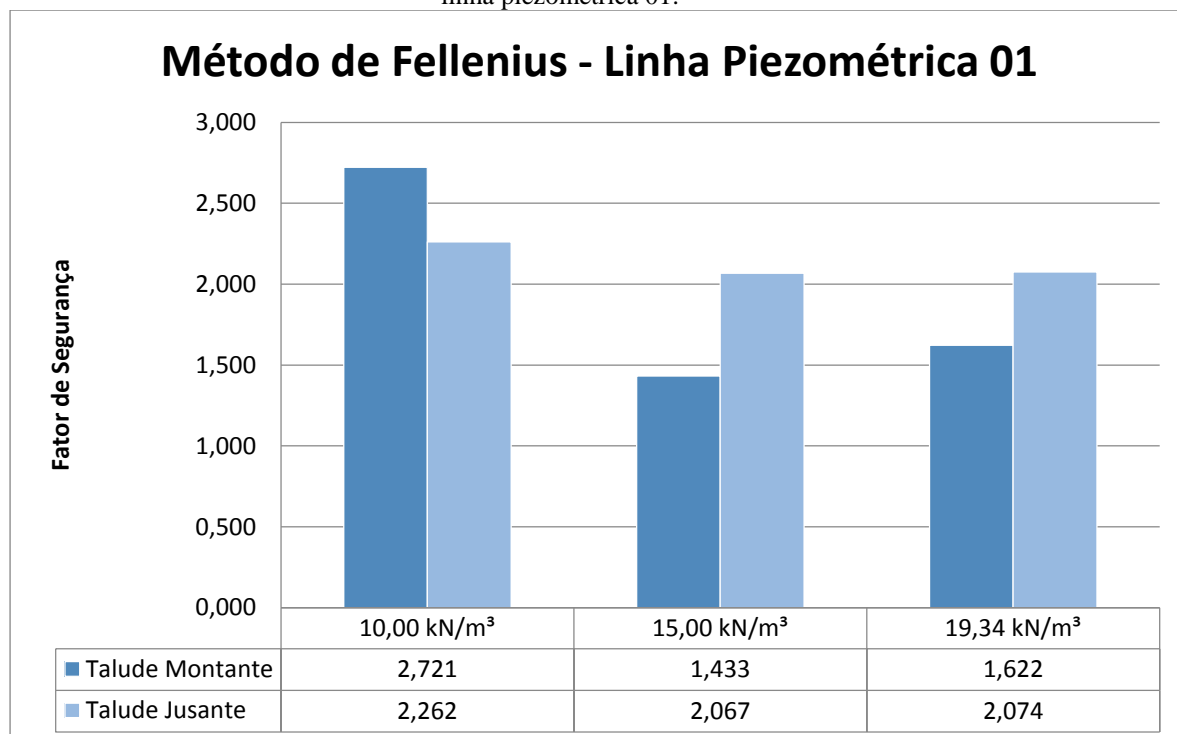
A última análise feita, é a variação do peso específico natural com o peso específico saturado correspondente. Nos gráficos 25, 26, 27 e 28 mostram os fatores de segurança, dos taludes, montante e jusante, com as três variações do peso específico por meio do método de Fellenius, quando a barragem está vazia, com a linha piezométrica 01, linha piezometria 02 e linha piezométrica 03 respectivamente.

Gráfico 25: fator de segurança por meio do método de Fellenius em função da variação do peso específico – barragem vazia.



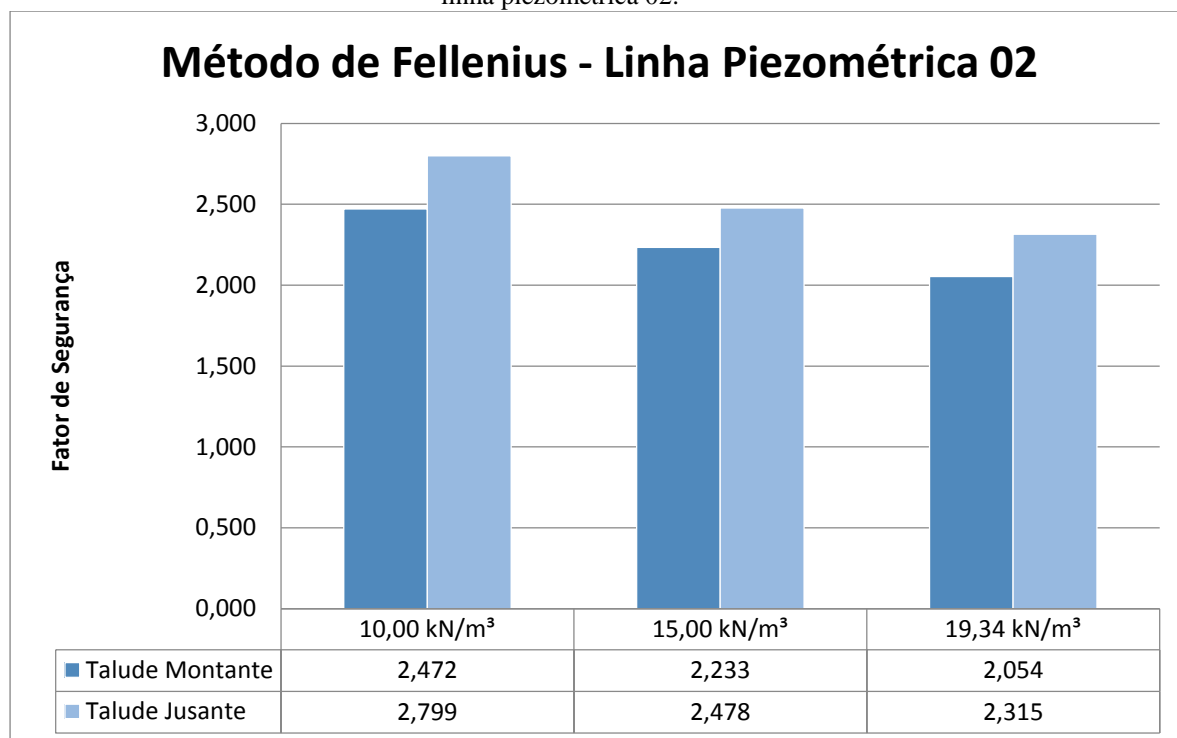
Fonte: o autor, 2019

Gráfico 26: fator de segurança por meio do método de Fellenius em função da variação do peso específico – linha piezométrica 01.



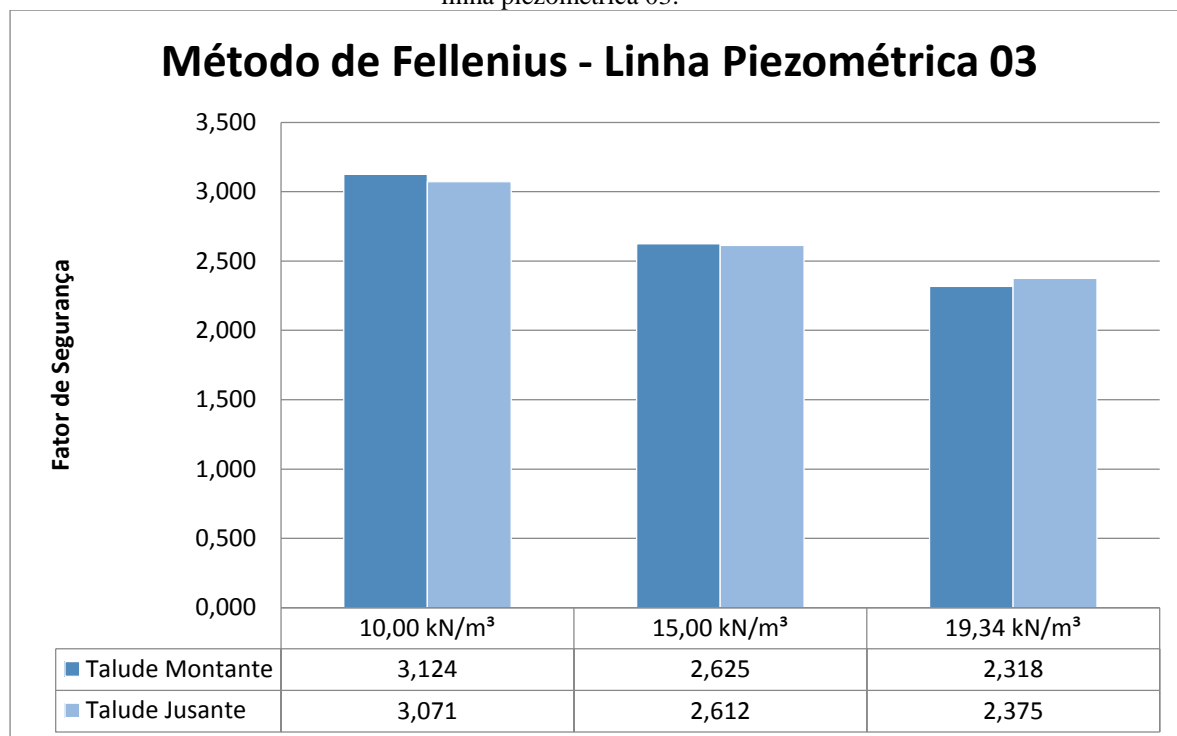
Fonte: o autor, 2019

Gráfico 27: fator de segurança por meio do método de Fellenius em função da variação do peso específico – linha piezométrica 02.



Fonte: o autor, 2019

Gráfico 28: fator de segurança por meio do método de Fellenius em função da variação do peso específico – linha piezométrica 03.

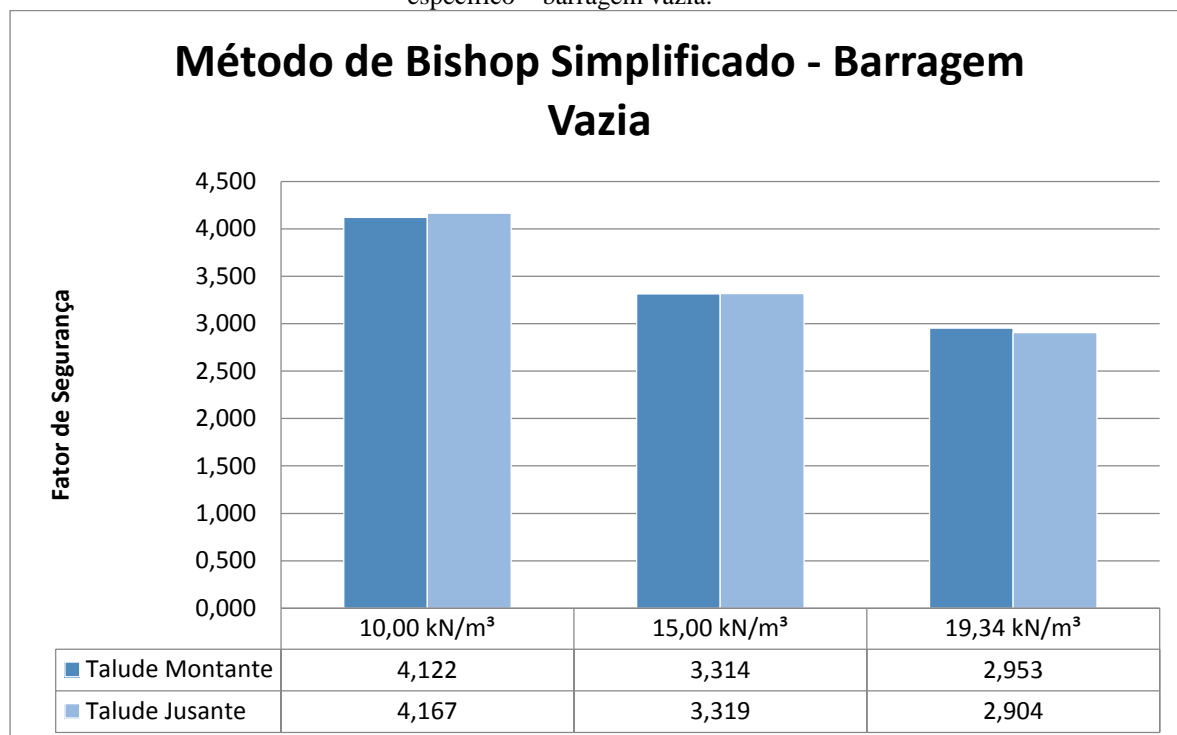


Fonte: o autor, 2019

Por outro lado, os gráficos 29, 30, 31 e 32 mostram os fatores de segurança, dos taludes, montante e jusante, com as três variações do peso específico por meio do método de

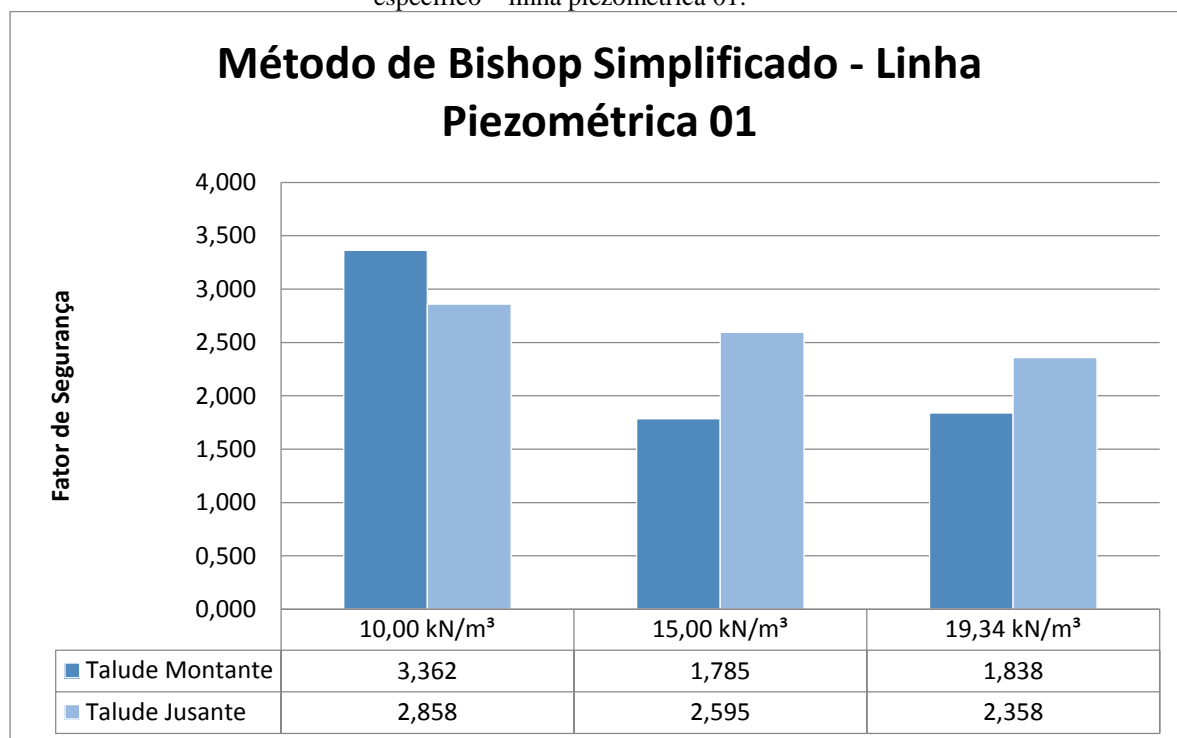
Bishop simplificado, quando a barragem está vazia, com a linha piezométrica 01, linha piezometria 02 e linha piezométrica 03 respectivamente.

Gráfico 29: fator de segurança por meio do método de Bishop simplificado em função da variação do peso específico – barragem vazia.



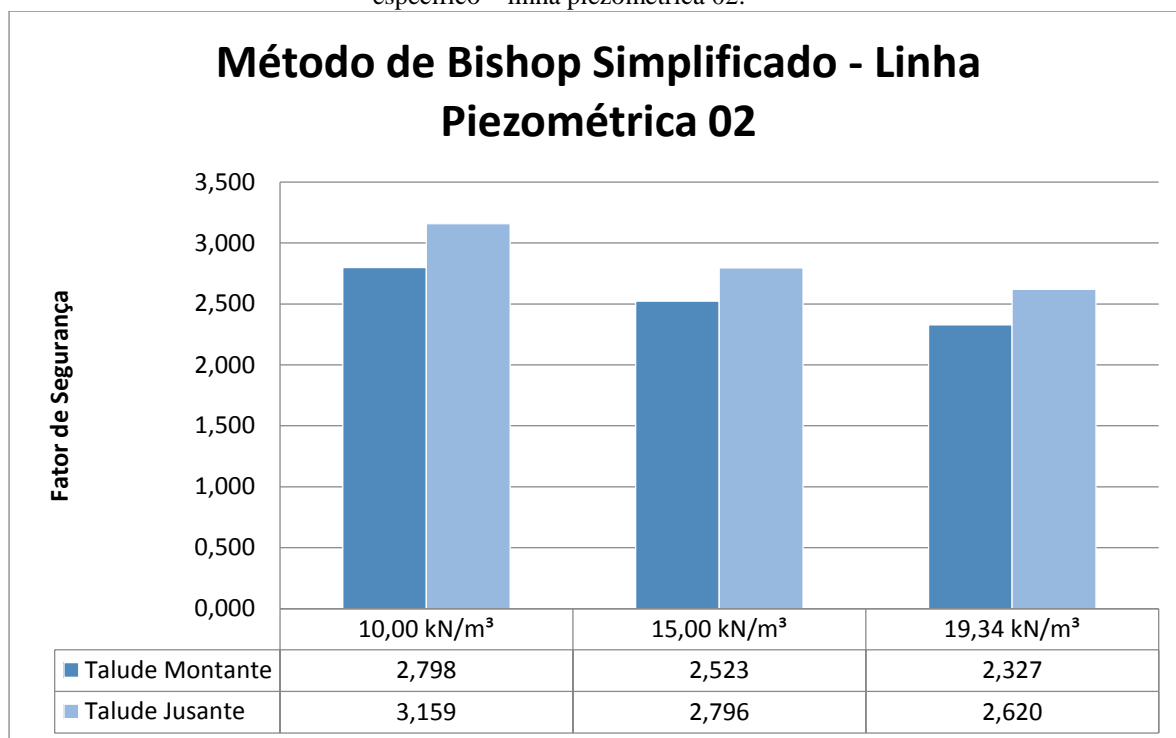
Fonte: o autor, 2019

Gráfico 30: fator de segurança por meio do método de Bishop simplificado em função da variação do peso específico – linha piezométrica 01.



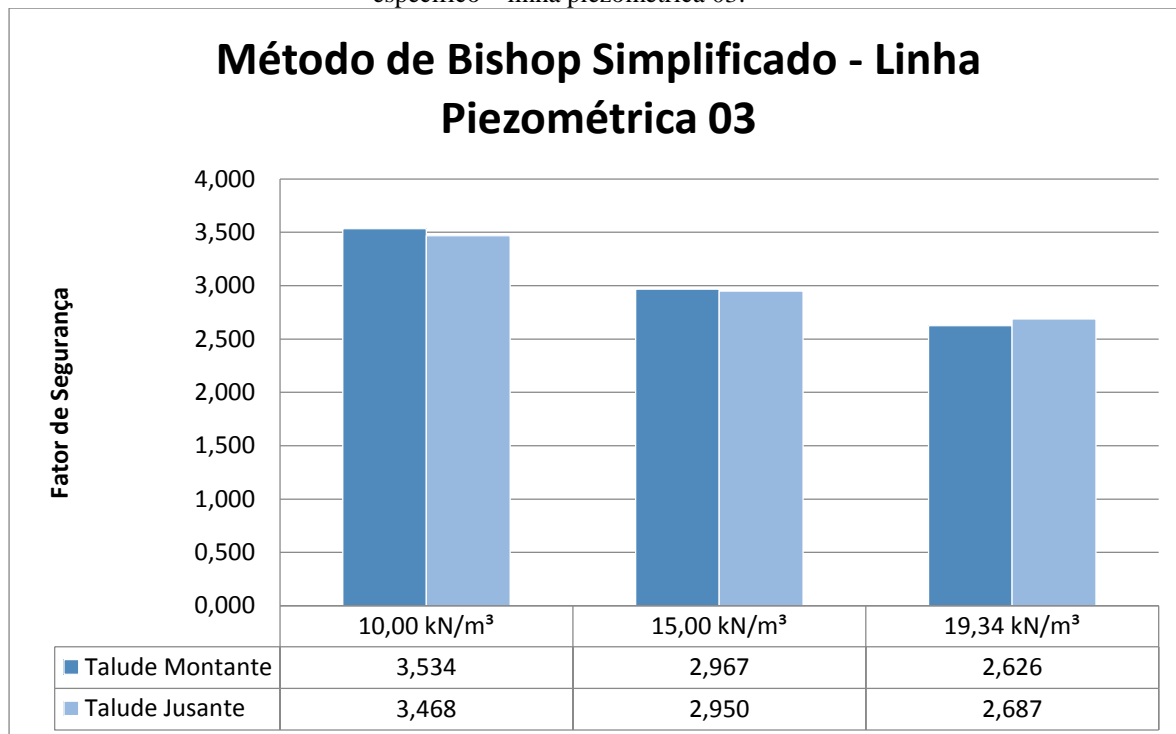
Fonte: o autor, 2019

Gráfico 31: fator de segurança por meio do método de Bishop simplificado em função da variação do peso específico – linha piezométrica 02.



Fonte: o autor, 2019

Gráfico 32: fator de segurança por meio do método de Bishop simplificado em função da variação do peso específico – linha piezométrica 03.

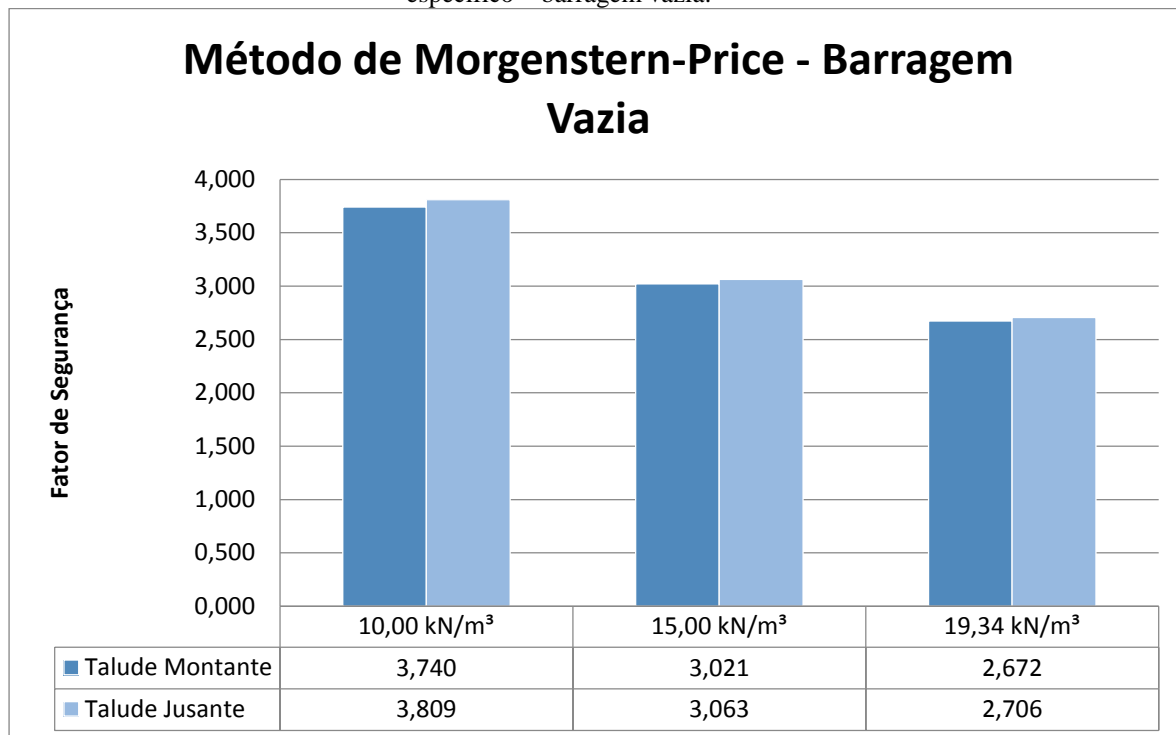


Fonte: o autor, 2019

Como também, os gráficos 33, 34, 35 e 36 mostram os fatores de segurança, dos taludes, montante e jusante, com as três variações do peso específico por meio do método de

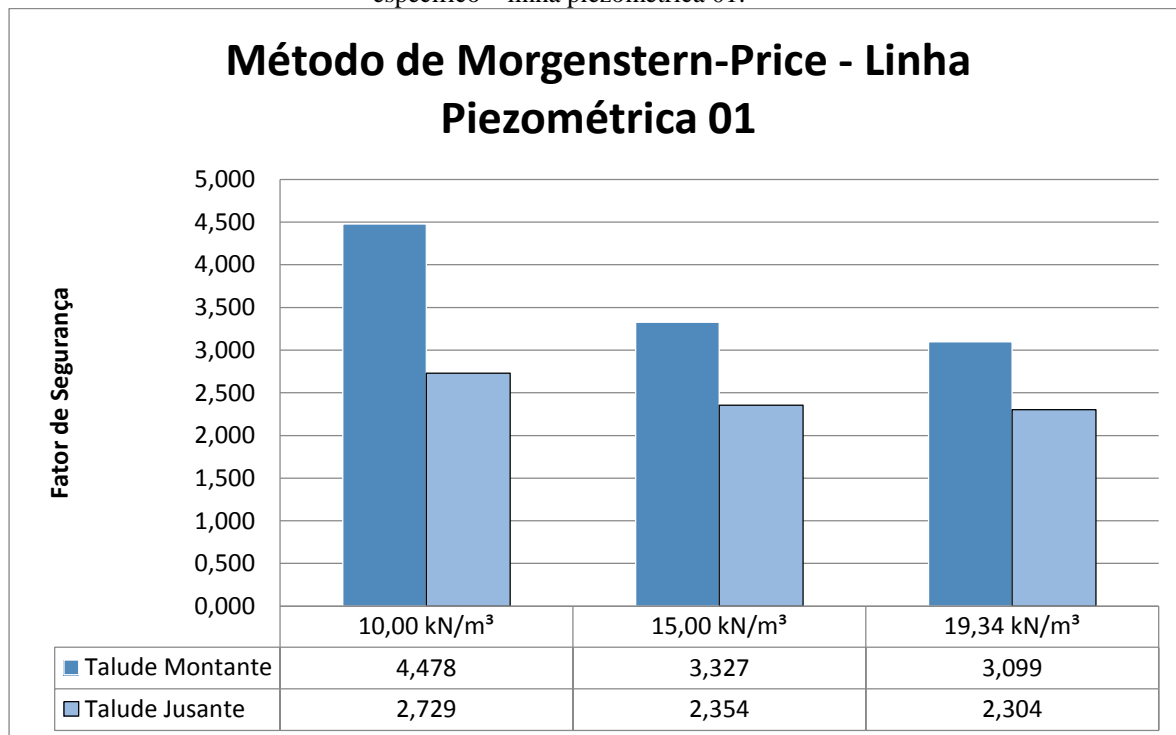
Morgenstern-Price, quando a barragem está vazia, com a linha piezométrica 01, linha piezometria 02 e linha piezométrica 03 respectivamente.

Gráfico 33: fator de segurança por meio do método de Morgenstern-Price em função da variação do peso específico – barragem vazia.



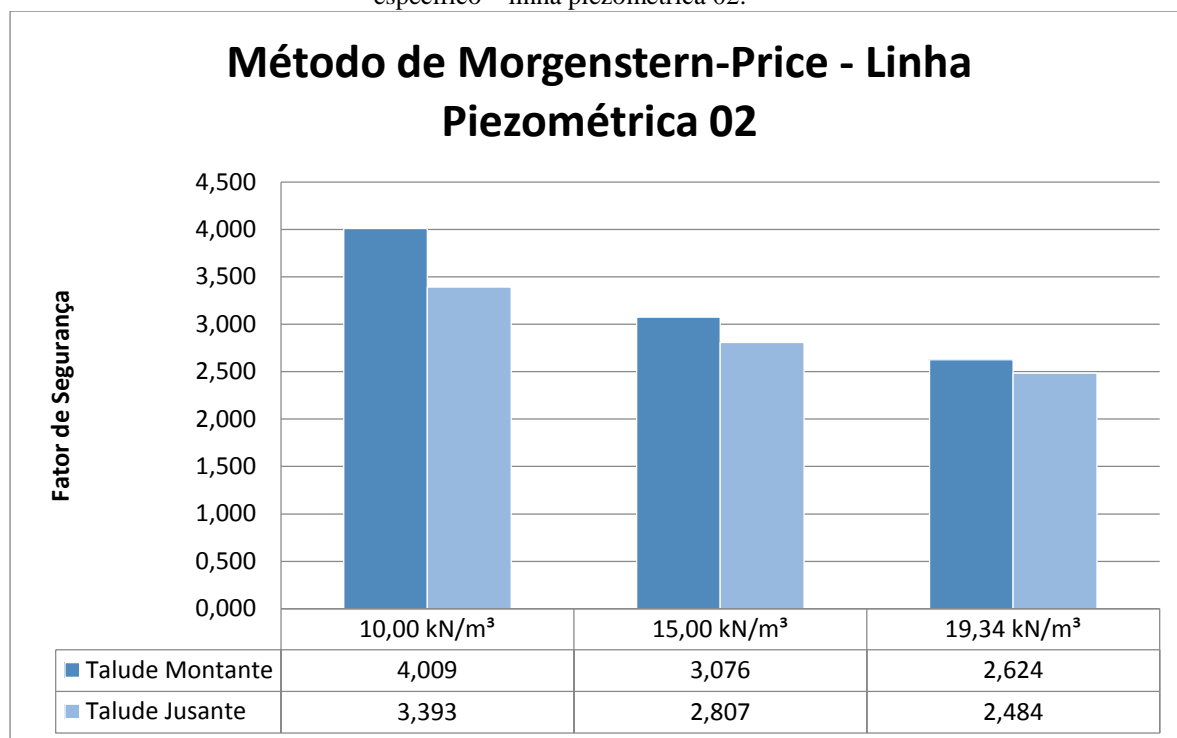
Fonte: o autor, 2019

Gráfico 34: fator de segurança por meio do método de Morgenstern-Price em função da variação do peso específico – linha piezométrica 01.



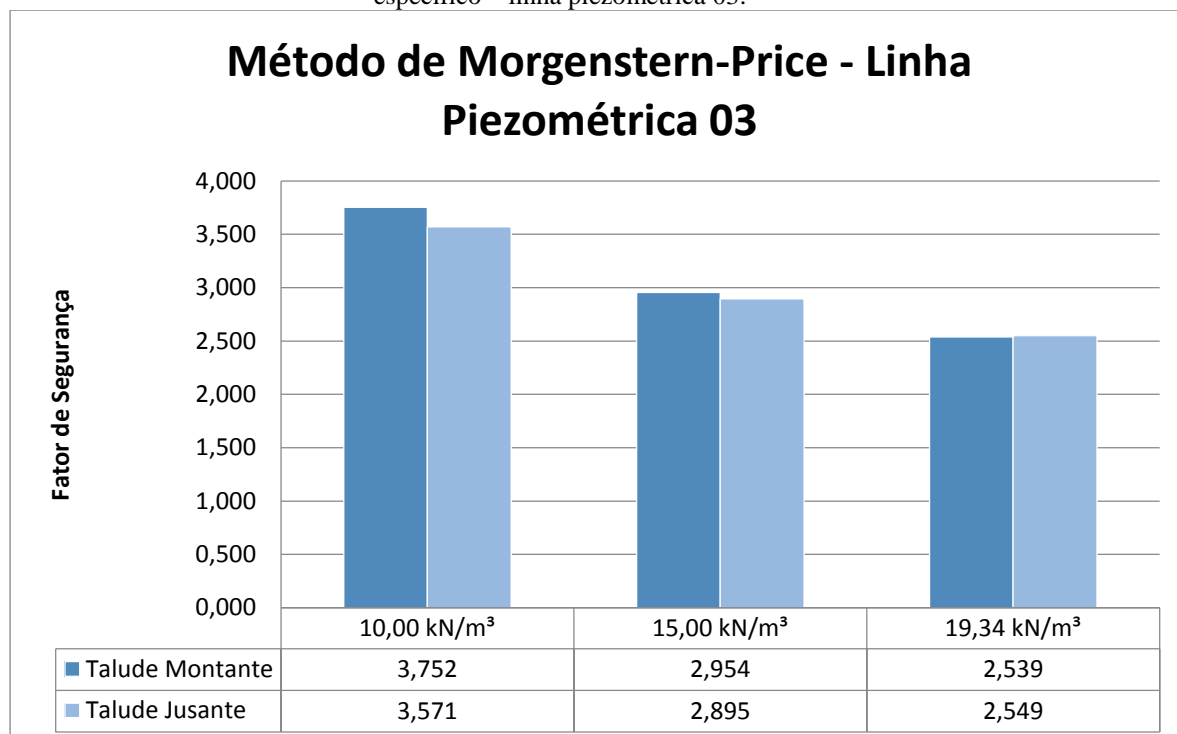
Fonte: o autor, 2019

Gráfico 35: fator de segurança por meio do método de Morgenstern-Price em função da variação do peso específico – linha piezométrica 02.



Fonte: o autor, 2019

Gráfico 36: fator de segurança por meio do método de Morgenstern-Price em função da variação do peso específico – linha piezométrica 03.



Fonte: o autor, 2019

Em contraste com o ângulo de atrito e a coesão, o peso específico apresentou uma queda no fator de segurança enquanto seu valor aumentava. Isso acontece porque o peso

específico contribui para as tensões cisalhantes mobilizadas. Como pode ser visto na equação 08 ou 09, o fator de segurança é a razão entre a resistência ao cisalhamento (τ_f) e as tensões mobilizadas (τ_{mob}), ou seja, ao analisar a equação 16 têm-se:

$$\tau_f = c' \cdot L_a + tg\phi' \cdot \sum N_r$$

Bem como:

$$\tau_{mob} = \sum W_n \cdot sen\alpha_n$$

O peso da fatia (W) é definido através da multiplicação da largura com a altura média da fatia com o peso específico do solo, em outras palavras, o peso específico contribui com as tensões mobilizadas, as quais aumentam as chances de ruptura do maciço da barragem. Por esse motivo, houve uma queda nos fatores de segurança, a cada aumento do peso específico, como foi visto nos gráficos: 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35 e 36.

13 CONCLUSÃO

Após o estudo realizado, conclui-se que um projeto de uma barragem, independentemente do uso, necessita de muita atenção para ser executado. É preciso ensaios do material do corpo da barragem e do solo onde será instalada, para assim conhecer os parâmetros geotécnicos que são de suma importância para a análise de estabilidade da estrutura.

Para calcular o fator de segurança, é preciso conhecer o peso específico natural, coesão e ângulo de atrito do material que compõe o corpo da barragem. Com esses parâmetros geotécnicos, é possível utilizar os métodos de cálculos de Fellenius, Bishop simplificado e Morgenstern-Price.

Tanto o método de Fellenius quanto o método de Bishop simplificado, não necessitam de softwares para serem calculados, devido à simplicidade dos processos de cálculo, entretanto o método de Morgenstern-Price já é indispensável o uso de programas computacionais, por ser um método complexo, porém mais completo, os softwares economizam tempo e apresentam resultados mais precisos.

Os fatores de segurança calculados apresentaram resultados satisfatórios por estarem acima do estabelecido pela norma 13.028/2017 (mineração – elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água). Neste caso, o fator de segurança estipulado por norma, consiste em 1,50. Os valores do fator de segurança calculados foram superiores ao da norma, como pode ser visto nos quadros 03, 04, 05, 06, 07, 08 e 09.

Diante aos resultados obtidos, o método de Fellenius apresentou três resultados abaixo do que é estabelecido por norma. O método de Bishop simplificado apresentou um resultado abaixo do que é permitido por norma. Já o método de Morgenstern-Price, todos os resultados foram acima do que é estipulado pela norma. Ao todo foram 56 resultados obtidos em cada método. Assim sendo, para determinar o fator de segurança dessa barragem, foi considerado o método de Morgenstern-Price, por ser um método mais preciso e por não ter apresentado nenhum resultado abaixo do que é permitido.

Outra conclusão do estudo é a importância dos parâmetros geotécnicos para definição dos fatores de segurança. É preciso saber corretamente qual o tipo de solo do maciço e da fundação da barragem, pois, um equívoco nos dados pode gerar fatores de segurança falsos, e assim, mudar toda a análise de um projeto. Isso pode ser visto nos gráficos que apresentam o comportamento do fator de segurança devido à variação dos parâmetros geotécnicos.

Enquanto os valores do ângulo de atrito e coesão aumentaram, por consequência o valor do fator de segurança aumentou, em contra partida, enquanto o valor do peso específico aumentou, o valor do fator de segurança diminuiu.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados – determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6.457: Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6.459: Solo – determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6.484: Solo – sondagens de simples reconhecimento com SPT – método de ensaio.** Rio de Janeiro. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6.502: Rochas e solos.** Rio de Janeiro. 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7.180: Solo – determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7.181: Solo – análise granulométrica.** Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7.182: Solo – ensaio de compactação.** Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9.813: Solo – determinação da massa específica aparente *in situ*, com emprego de cilindro de cravação.** Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11.682: Estabilidade de encostas.** Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13.028: Mineração – elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - requisitos.** Rio de Janeiro. 2017.

AUTOCAD. Versão 19.0.55.0: Autodesk Inc. 2012

BAESA. **A usina.** Disponível em: <<http://www.baesa.com.br/conteudo.aspx?id=2>> Acessado em 29 de maio de 19.

BUDHU, Muni. **Fundações e estruturas de contenção.** 1. ed. Tradução: Luiz Antonio Vieira Carneiro. Revisão técnica: Maria Esther Soares Marques. Rio de Janeiro. LTC. 2017. Título original: *Foundations and earth retaining structures*. ISBN 978-85-216-2286-4

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações – Fundamentos**. 6. ed. Rio de Janeiro. LTC. 1988.

CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson; ALBIERO, José Henrique. **Fundações diretas – projeto geotécnico**. São Paulo. Oficina de textos. 2011.

COSTA, Walter Duarte. **Geologia de barragens**. São Paulo. Oficina de textos. 2012.

COSTA, Diego Crepaldi. **Proposta para adequação de uma barragem de terra no município de Ilícinea - MG**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil do Centro Universitário do Sul de Minas UNIS-MG. Varginha. p. 100. 2015.

CRAIG, Robert F. **Craig, mecânica dos solos**. 7. ed. Tradução: Amir Kurban. Rio de Janeiro. LTC. 2013. Título original: *Craig's soil mechanics*. ISBN 978-85-216-1544-6

DAS, Braja M.; SOBHAN, Khaled. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 8. ed. Tradução: Noveritis do Brasil. Revisão técnica: Roberta Boszczowski. São Paulo. Cengage Learnig. 2014. Título original: *Principles of geotechnical engineering*. ISBN 978-85-221-1823-6.

FREITAS, Marco António Coelho. **Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Morgenstern-Price e Correia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto. p. 146. 2011.

FURNAS. **Usina de Funil**. Disponível em:
<<http://www.furnas.com.br/subsecao/119/Usina%20de%20Funil%20-%202016%20MW>>
Acessado em 29 de maio de 2019.

FURNAS. **Usina de Furnas**. Disponível em:
<<http://www.furnas.com.br/subsecao/120/Usina%20de%20Furnas%20-%20201.216%20MW>> Acessado em 29 de maio de 2019.

FURNAS. **Usina de Itumbiara**. Disponível em:
<<http://www.furnas.com.br/subsecao/121/Usina%20de%20Itumbiara%20-%20202.082%20MW>> Acessado em 29 de maio de 2019.

GHOSTUDIO. Versão 10.0.1.17733: Geoslope International Ltd. 2019.

GIL, Euzébio José. **Módulo I – Barragens: aspectos legais, técnicos e socioambientais: Unidade 8 – aspectos geológicos e geotécnicos**. 2013. p. 85. Notas de Aula. Curso Segurança de Barragens.

GOOGLE EARTH. Versão 7.3.2.5776: Google LLC. 2019.

HENRI, Baranger; et al. **Aménagement de Roselend – La bâthie**. 2011. Disponível em :
<https://www.edf.fr/sites/default/files/Hydraulique/pays-de-savoie/documents/roselend_bd_2011.06.pdf> Acessado em 29 de maio de 2019.

INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE. **Tecnologia de barragens e disposição de rejeitos.** Disponível em: <<http://www.itv.org/linha-de-pesquisa/tecnologia-de-barragens-e-disposicao-de-rejeitos/>> Acessado em 01 de abril de 2019.

ITAIPU BINACIONAL. **Principais dados técnicos.** 2016. Disponível em: <<https://turismoitaipu.com.br/pt/dados-tecnicos>> Acessado em 29 de maio de 2019.

MAGALHÃES, Marcelo de Souza. **Dimensionamento de estruturas de contenção atirantadas utilizando os métodos de equilíbrio limite e de elementos finitos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Rio de Janeiro. p. 192. 2015.

MARANGON, Márcio. **Tópicos em geotecnia e obras de terra:** Unidade 04 – estabilidade de taludes. 2006. p. 203. Notas de aula.

MATOS, Antonio Teixeira de; SILVA, Demetrius David da; PRUSKI, Fernando Falco. **Barragens de terra de pequeno porte.** Viçosa. Editora UFV. 2012.

MELLO, Flavio Miguez de; PIASENTIN, Corrado. **A história das barragens no Brasil, séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens.** Rio de Janeiro. Comitê Brasileiro de Barragens – CBDB. 2011.

OLIVEIRA, Antonio Manoel dos Santos; BRITO, Sérgio Nertan Alves de. **Geologia de Engenharia.** São Paulo. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia – ABGE. 1998.

PEREIRA, Armando Belato. **Obras de terra e enrocamento:** Aula 05 – métodos das fatias para superfície circular de ruptura. 25 de fevereiro de 2019, 03 de julho de 2019. p. 36. Notas de Aula.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso básico de mecânica dos solos.** 3. ed. São Paulo. Oficina de Textos. 2006.

PRUSKI, Fernando Falco. **Conservação de solo e água – práticas mecânicas para o controle de erosão hídrica.** 2. ed. Viçosa. Editora UFV. 2009.

VALE, **Entenda as barragens da vale.** 2017. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes_brumadinho/Paginas/Entenda-as-barragens-da-Vale.aspx> Acessado em 29 de maio de 2019.

WHITE, Robert E. **Princípios e práticas da ciência do solo – o solo como um recurso natural.** 4. ed. Tradução: Iara Fino Silva; Durval Dourado Neto. São Paulo. Organização Andrei editora. 2009. Título original: Principle and practice of soil science – the soil as a natural resource.