



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**ENGENHARIA CIVIL**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRAULICA E AMBIENTAL**

**WANDERSON HUGUES DE VASCONCELOS PEDROSA**

**DIMENSIONAMENTO DE TALUDES DE TERRA SEM PERCOLAÇÃO POR MEIO  
DA ANÁLISE DE ESTABILIDADE**

**FORTALEZA**

**2022**

WANDERSON HUGUES DE VASCONCELOS PEDROSA

DIMENSIONAMENTO DE TALUDES DE TERRA SEM PERCOLAÇÃO POR MEIO DA  
ANÁLISE DE ESTABILIDADE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Civil da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito parcial para  
a obtenção do título Bacharel em Engenharia  
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

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

---

P414d Pedrosa, Wanderson Hugues de Vasconcelos.

Dimensionamento de taludes de terra sem percolação por meio da análise de estabilidade  
/ Wanderson Hugues de Vasconcelos Pedrosa. – 2022.

72 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro  
de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme.

1. Dimensionamento de taludes. 2. Modelos matemáticos. 3. Geotecnia. I. Título.

CDD 620

---

WANDERSON HUGUES DE VASCONCELOS PEDROSA

DIMENSIONAMENTO DE TALUDES DE TERRA SEM PERCOLAÇÃO POR MEIO DA  
ANÁLISE DE ESTABILIDADE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Civil da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito parcial para  
a obtenção do título Bacharel em Engenharia  
Civil.

Aprovada em: 11/02/2022.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme  
(Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Alfran Sampaio Moura  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

MSc. Amanda Vieira Hohn  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a mim mesmo, pois mesmo com tantas adversidades e situações que me jogaram para baixo durante toda a graduação e, em especial, nesse último ano, eu venci! Desejo que o Wanderson do futuro olhe para esse momento como um registro do tempo que mostra o quanto ele foi capaz de superar e utilize isso como combustível para continuar crescendo.

À minha mãe, Denise, por todo o esforço dispendido em criar da melhor forma possível seus filhos, mesmo com tantas limitações (VOCE É INCRÍVEL), por me apoiar, me fazer companhia e sempre buscar o melhor para mim, sempre buscando me julgar o mínimo possível, mesmo discordando de mim. Eu sei que as vezes não sou fácil mãe, mas obrigado por nunca desistir de mim. Te amo!

À minha irmã Krislane, sem a qual, não estaria nem fazendo faculdade e muito menos conseguindo superar os problemas que surgiram na nossa família. Muito obrigado por seu apoio e dedicação à família irmãzinha.

Ao meu avô Ribeiro, por ter servido como alicerce da família. Aos meus tios Cláudia, Breno e Maria Tereza, por terem sido um grande apoio à família. Por fim, sei que não são humanos e não podem ler, mas gostaria de deixar esse registro no tempo, obrigado aos meus dois cachorros Sansão e Mike, que trouxeram muitas alegrias, energia e vida à casa, que por muitas vezes, não tinha mais nenhuma outra fonte desses elementos.

À minha namorada, Talyta, pelo companheirismo ao longo desses 3 anos e meio. Obrigado por seu carinho, paciência com minhas inúmeras falhas, por me mostrar um mundo mais doce e colorido. Você faz parte dessa conquista e tem fundamental importância em minha vida. Que estejamos juntos nas vitórias que ainda estão por vir. Amo você!

Aos meus colegas de graduação e amigos: Alexandre e Brenda. Muito obrigado pela amizade, companheirismo e ensinamentos (vocês, me ensinaram mais que muitos professores). Obrigado por seguirem ao meu lado, mesmo com tantos sumiços que dou, vocês são incríveis!

Aos meus colegas de graduação e amigos (que só não estão no parágrafo acima por serem de outro grupo): Levi, Daniel, Luís Paulo, Jessica e Luzardo. Muito obrigado a todos pela amizade, confiança, risadas e alegria que tive com vocês durante todo esse tempo, seja nas horas de jogo ou mesmo só jogando conversa fora. Sem vocês, a jornada teria sido muito mais difícil e triste.

Ao meu orientador, Professor Dr. Rosiel Ferreira Leme, agradeço por toda assistência, solicitude, disponibilidade e ensinamentos. O meio acadêmico precisa de profissionais como você.

Aos membros da banca, pela disponibilidade. As análises elaboradas por vocês serão de grande valia para o presente trabalho.

Aos professores que fizeram parte da minha graduação. Em especial aos professores Dr. Manuel Mendonça e Dr. Francisco Osny, por me darem animo no curso e para a jornada de trabalho, ensinando com paixão o que sabem.

Aos meus amigos, Iago, Nicolas, Diego, Daniel e Julia, pelo apoio, amizade e companheirismo de sempre.

Por fim, a todos que de alguma forma contribuíram para essa conquista. Dedico essa vitória a vocês!

## RESUMO

Nas mais diversas obras em que há a necessidade da execução de um talude, é comum a utilização de etapas de pré-dimensionamento pouco precisas que utilizam apenas o tipo de solo ou valores tabelados, ocasionando possíveis retrabalhos em casos de constatada a instabilidade da estrutura. Assim, este trabalho tem por finalidade a determinação de um modelo matemático preditivo, utilizando parâmetros geotécnicos, para obtenção do ângulo de inclinação de taludes homogêneos e isotrópicos. A metodologia empregada compreendeu, inicialmente, na realização de 632 simulações numéricas, adotando a variabilidade dos parâmetros: altura; peso específico; ângulo de atrito e coesão no software Geostudio 2021.4 utilizando os módulos Slope/W e Seep/W. Em seguida, foi definido um modelo de regressão não-linear, utilizando a ferramenta Solver do Microsoft Excel, definiu-se os coeficientes da equação matemática para o cálculo do ângulo do talude para um erro mínimo. O modelo matemático determinado mostrou que os valores de altura, coesão e ângulo de atrito mais baixos apresentaram um erro percentual muito elevado. Foi observado ainda, que a variável do peso específico poderá ser desconsiderada da equação devido os baixos valores de seus coeficientes. Para validação da equação proposta, foram utilizadas faixas de valores apresentadas na literatura para vários tipos de solo e dados fora do espectro de valores que fez parte do processo de modelagem, além da utilização de uma versão simplificada do modelo de talude estudado no trabalho de Lehmkuhl e Abreu (2021). Os resultados obtidos apresentaram fatores de segurança aceitáveis para todos os tipos de solo. A presente pesquisa também avaliou, no processo de validação, a estabilidade dos taludes utilizando os conceitos de resistência para solos não saturados. Para esta condição, os modelos apresentaram-se estáveis, com coeficientes de segurança acima dos valores mínimos recomendados. Com isso, os resultados encontrados se mostraram promissores, indicando que o modelo pode ser adotado para um dimensionamento de taludes mais otimizado, com condições aceitáveis de segurança, justificando a sua utilização, de modo que sejam reduzidos custos e tempo.

**Palavras-chave:** dimensionamento de taludes; modelos matemáticos; geotecnia.

## ABSTRACT

In the most diverse works in which there is a need to execute a slope, it is common to use inaccurate pre-dimensioning steps that use only the type of soil or tabulated values, causing possible reworks in cases of verified instability of the structure. Thus, this work aims to determine a predictive mathematical model, using geotechnical parameters, to obtain the slope angle of homogeneous and isotropic slopes. The methodology used initially comprehended 632 numerical simulations, adopting the variability of parameters: height; specific weight; friction and cohesion angle in Geostudio 2021.4 software using Slope/W and Seep/W modules. Then, a non-linear regression model was defined, using the Solver tool of Microsoft Excel, the coefficients of the mathematical equation were defined for the calculation of the slope angle for a minimum error. The mathematical model determined showed that the lowest values of height, cohesion and friction angle presented a very high percentage error. It was also observed that the specific weight variable may be disregarded from the equation due to the low values of its coefficients. For validation of the proposed equation, ranges of values presented in the literature for various types of soil and data outside the spectrum of values that were part of the modeling process were used, in addition to the use of a simplified version of the slope model studied in Lehmkuhl's work. and Abreu (2021). The results obtained showed acceptable safety factors for all types of soil. The present research also evaluated, in the validation process, the stability of the slopes using the concepts of resistance for unsaturated soils. For this condition, the models were stable, with safety coefficients above the recommended minimum values. Thus, the results found were promising, indicating that the model can be adopted for the design of slopes with acceptable safety conditions, justifying its use, so that costs and time are reduced.

**Keywords:** Slope design. Mathematical models. Geotechnics.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Seções Tipo e Inclinações de Taludes de Barragens Homogêneas .....	14
Tabela 2-Resultado de 1500 ensaios realizados pelo U.S BUREAL OF RECLAMATION....	17
Tabela 3-Fatores de segurança mínimos para deslizamentos .....	18
Tabela 4-Lista de Parâmetros Adotados .....	27
Tabela 5-Valores de Parâmetro adotados para a análise controle .....	28
Tabela 6-Dados da validação do caso 1 do talude de Lehmkuhl e Abreu (2021).....	29
Tabela 7-Dados da validação do caso 2 do talude de Lehmkuhl e Abreu (2021).....	29
Tabela 8-Erro percentual médio absoluto entre os dados simulados e modelados em relação a coesão .....	32
Tabela 9-Erro percentual médio absoluto entre os dados simulados e modelados em relação ao ângulo de atrito .....	33
Tabela 10-Erro percentual médio absoluto entre os dados simulados e modelados em relação ao peso específico .....	33
Tabela 11-Erro percentual médio entre os dados simulados e modelados em relação a coesão .....	34
Tabela 12-Erro percentual médio entre os dados simulados e modelados em relação ao ângulo de atrito .....	34
Tabela 13-Erro percentual médio entre os dados simulados e modelados em relação ao peso específico .....	34
Tabela 14-Resultados de validação para cada tipo de solo.....	35
Tabela 15-Resultados da validação para valores fora da faixa calculada.....	36
Tabela 16-Resultados da validação do caso 1 do talude de Lehmkuhl e Abreu (2021). ....	38
Tabela 17-Dados da validação do caso 2 do talude de Lehmkuhl e Abreu (2021).....	38

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1- Forças normais e de corte numa fatia genérica.....	16
Figura 2- Menisco capilar.....	22
Figura 3-Fluxograma de Metodologia do Trabalho.....	25
Figura 4-Áreas de entrada e saída para formar superfícies de deslizamento de teste .....	26
Figura 5-Esquema das superfícies de deslizamento válidas.....	26
Figura 6-Talude de Lehmkuhl e Abreu (2021). .....	29
Figura 7-Regressão Dados Simulados x Dados Modelados.....	30
Figura 8-Análise comparativa Dados Simulados x Dados Modelados para $H = 6$ .....	31
Figura 9-Análise comparativa Dados Simulados x Dados Modelados para $H = 10$ .....	31
Figura 10-Análise comparativa Dados Simulados x Dados Modelados para $H = 14$ .....	31
Figura 11-Análise comparativa Dados Simulados x Dados Modelados para $H = 18$ .....	32
Figura 12- Talude Simplificado de Lehmkuhl e Abreu (2021) no caso 1 da validação .....	38
Figura 13-Talude Simplificado de Lehmkuhl e Abreu (2021) no caso 2 da validação .....	38

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	12
1.1. Justificativa.....	12
1.2. Objetivos.....	13
1.2.1. Objetivo Geral.....	13
1.2.2. Objetivos Específicos .....	13
1.3. Estrutura Organizacional .....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	14
2.1. Taludes.....	14
2.2. Modelos de dimensionamento de taludes .....	14
2.3. Analise de estabilidade de taludes .....	15
2.3.1. Tipos e causas de Instabilidade de Taludes .....	16
2.3.2. Parâmetros do solo .....	17
2.3.3. Determinação do fator de segurança.....	18
2.3.4. Métodos para cálculo de estabilidade de talude.....	19
2.4. Modelagem estatística .....	20
2.5. Conceitos gerais de solos não saturados.....	21
2.5.1. Sucção .....	22
2.5.2. Resistência ao cisalhamento em solos não saturados .....	23
3. MATERIAIS E METODOS.....	25
3.1. Estudos de Estabilidade de Taludes .....	25
3.2. Parâmetros Geotécnicos .....	27
3.3. Analise Estatística para Determinação do Equacionamento .....	27
3.4. Verificação da validade e eficiência da metodologia proposta.....	28
3.4.1. Simulações adotando os dados do U.S BUREAL OF RECLAMATION.....	28
3.4.2. Simulações com dados fora do intervalo .....	28
3.4.3. Simulações com os dados de Lehmkuhl e Abreu (2021).....	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	30
4.1. Modelo Matemático para Estimativa do Ângulo de Inclinação do Talude .....	30
4.1.1. Analise Estatística do Modelo .....	30
4.1.2. Analise das Variabilidade dos Parâmetros do Modelo.....	32
4.2. Validação do Modelo .....	35
4.2.1. Simulações Avaliatórias .....	35

4.2.2. Maciço de Lehmkuhl e Abreu (2021) .....	37
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	40
5.1. Conclusões.....	40
5.2. Sugestões para trabalhos futuros .....	41
REFERÊNCIAS .....	42

## 1. INTRODUÇÃO

Talude é a denominação que se dá a qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha. Ele pode ser natural, também denominado de encosta, ou construído pelo homem, como, por exemplo, os aterros e corte.

Na fase de projeto de uma obra que seja necessária a execução de talude, é feito o dimensionamento por meio de métodos de dimensionamento mais simples, em que estabelecem, por exemplo, a inclinação em função do tipo de solo. E devido a simplicidade dos métodos de dimensionamento existentes, torna-se necessário realizar um estudo de estabilidade após o pré-dimensionamento com o objetivo de avaliar se o talude projetado é estável para a geometria proposta.

Assim, diferente do processo de dimensionamento, existem inúmeros métodos de cálculo que avaliam a estabilidade de uma determinada geometria de um talude, dependendo da obra de engenharia.

Com isso, uma vez que, na análise de estabilidade, venha-se a concluir que o dimensionamento feito gerou um talude instável, o projeto volta a etapa de dimensionamento para ser refeito, gerando custos financeiros e de tempo para a obra.

### 1.1. Justificativa

Os métodos de dimensionamento de taludes baseados no tipo solo que os constitui leva a desconsideração de fatores como a altura do talude ou mesmo a resistência do solo, de forma que, devido a essa simplicidade dos métodos, isso pode resultar em uma falta de acurácia, levando a projetos superdimensionados ou mesmo subdimensionados.

A imprecisão dos atuais métodos provoca a necessidade de estudos de estabilidade após a fase de dimensionamento, tendo o objetivo de avaliar se o talude proposto apresenta, de fato, a estabilidade necessária. Sendo as análises de estabilidade, fonte de diversos estudos e modelos ao longo dos anos, o que gera um alto grau de precisão. Entretanto, dependendo dos resultados destes estudos isso pode implicar no redimensionamento da obra, onerando o projeto além de estender o tempo do desenvolvimento do mesmo.

Assim, tendo em vista a baixa precisão nos atuais métodos de dimensionamento e, em contraste, a alta confiabilidade nos processos de análise de estabilidade. Um modelo matemático de dimensionamento de taludes, a partir de modelos de análise de estabilidade, justifica-se, visto que, a diversidade de características nos maciços são muitas e, à medida que

a engenharia evolui, o requerimento de métodos que acompanhem essa evolução se torna cada vez mais forte. Com isso, um modelo que venha a considerar todas, ou quase todas, as características geométricas e resistivas do maciço de forma rápida e confiável, tende a reduzir erros que ocasionariam perdas financeiras e de prazo nas obras.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo Geral

Determinar um modelo matemático para dimensionar taludes homogêneos, isotrópicos e sem percolação.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar a variabilidade dos parâmetros do modelo;
- Verificar validade e eficiência da metodologia de cálculo proposta, implementando-a em diferentes taludes;
- Avaliar a estabilidade de taludes dimensionados com a metodologia proposta, utilizando parâmetros de resistência de solos não saturados.

## 1.3. Estrutura Organizacional

O presente trabalho está organizado e dividido em 5 capítulos:

- a) No capítulo 1 é apresentada, de forma resumida, a problemática do tema abordado, além da relevância e justificativa da pesquisa, assim como os objetivos geral e específicos;
- b) No capítulo 2, é abordada a revisão literária necessária para o entendimento da presente pesquisa;
- c) No capítulo 3, é descrita a metodologia adotada para o desenvolvimento do estudo, bem como a organização e análise estatística dos dados;
- d) No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos no presente estudo, e uma análise, contendo informações essenciais para a conclusão deste trabalho;
- e) No capítulo 5, é apresentada a conclusão do trabalho, além de sugestão para trabalhos futuros. Por último, são apresentadas as referências bibliográficas citadas no texto e os apêndices com os dados utilizados neste trabalho.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

### 2.1. Taludes

Talude é uma denominação genérica que compreende qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha. Podendo ser natural, também nomeado de encosta ou vertente, ou artificial, como os cortes e aterros feitos pelo homem (FIORI; CARMIGNANI, 2009). Os taludes artificiais são formados por diversos tipos de materiais e possuem características estruturais conhecidas, tornando-os mais homogêneos e previsíveis que os naturais (GUIDICINI; NIEBLE, 1984).

Do ponto de vista teórico, um talude se apresenta como uma massa de solo submetida a três campos de força distintos: forças devidas ao peso dos materiais, forças devidas ao escoamento de água e forças devidas à resistência ao cisalhamento (PEREIRA, 2013).

### 2.2. Modelos de dimensionamento de taludes

Nas etapas iniciais de uma obra, quando não há dados geotécnicos suficientes para a realização dos cálculos de estabilidade, são necessários valores para as inclinações dos taludes a fim de se estimar os custos. Nestes casos, é costume se adotar inclinações para os taludes (AYALA, 2018).

Como se trata de uma estrutura presente em diversas áreas da engenharia, sua variedade nas formas de dimensionamento se estende a todas elas.

No caso de barragens com aterro homogêneo, USBR (1967) apresenta as sugestões, apresentadas na Tabela 1, para as inclinações dos taludes, sobre fundações estáveis.

Tabela 1 - Seções Tipo e Inclinações de Taludes de Barragens Homogêneas

Tipo	Sujeita a esvaziamento rápido	Classificação do solo	Inclinação de montante	Inclinação de jusante
Homogênea ou homogênea modificada	Não	GC, GM, SC SM CL,	2,5: 1	2: 1
		ML CH, MH	3: 1	2,5: 1
			3,5: 1	2,5: 1
Homogênea modificada	Sim	GC, GM, SC SM CL,	3: 1	2: 1
		ML	3,5: 1	2,5: 1
		CH, MH	4: 1	2,5: 1

Fonte: Hradilek (2002)

Quando se analisa a área de infraestrutura rodoviária, a situação não muda tanto. Os taludes rodoviários são comumente dimensionados baseando-se na experiência do profissional responsável. Tendo variações de inclinação entre 1:1 e 1:1,5. Este método é bastante usado devido à economia que propicia (BIANCHINI, 2000).

Assim, com métodos tão simplificados para um projeto tão importante, acaba sendo necessária uma etapa seguinte que garanta sua viabilidade.

### 2.3. Analise de estabilidade de taludes

O objetivo da análise de estabilidade segundo Gerscovich (2009) é avaliar a possibilidade de ocorrência de escorregamento de massa de solo presente em talude natural ou construído. Já para Ferreira et al (2012), esse pode ser dividido na avaliação da necessidade de aplicação de medidas de estabilização em taludes naturais e no estudo da solução ótima, ou seja, a inclinação adequada, para taludes artificiais.

Segundo explica Pereira (2013), devido a frequente homogeneidade mais acentuada dos taludes artificiais frente aos maciços naturais, esses se adequam melhor às teorias de análise de estabilidade. Que consistem de um estudo aprofundado que, por meio de diversos processos, determina o quanto próximo da ruptura um determinado talude se encontra, baseando-se nos parâmetros, previamente indicados, atuantes sobre a estrutura.

Podendo se dividir a análise de estabilidade em três métodos:

- Métodos analíticos: baseados em modelagens computacionais e matemáticas de tensões, forças e limite.
- Métodos experimentais: emprego de modelos físicos;
- Métodos observacionais: baseados na experiência do profissional e/ou tabelas ou ábacos.

Segundo Calle (2000), o método analítico tem a vantagem de quantificar o grau de segurança, não sendo possível tal quantificação com os outros dois métodos. Os métodos analíticos, empregando o equilíbrio limite, expressam a estabilidade de um talude ou uma encosta por um Fator de Segurança (FS).

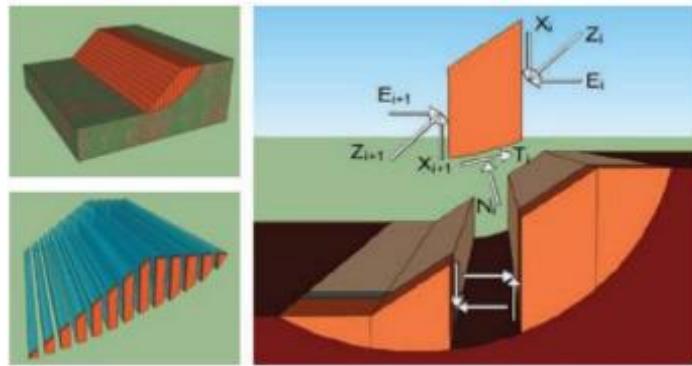
No tocando a teoria do equilíbrio limite Gerscovich (2009) afirma que

O método de análise por equilíbrio limite consiste na determinação do equilíbrio de uma massa ativa de solo, a qual pode ser delimitada por uma superfície de ruptura circular, poligonal ou de outra geometria qualquer. O método assume que a ruptura se dá ao longo de uma superfície e que todos os elementos ao longo desta superfície atingem a condição de FS, simultaneamente.

Almeida (2016) complementa essa explicação ao afirmar que os métodos de equilíbrio limite assumem na análise de estabilidade de taludes a ruptura de uma massa de solo ou rocha, dividida em lamelas ou blocos, ao longo de uma superfície potencial de ruptura, como representado na Figura 1. Sendo determinado o FS a partir de equações que satisfaçam

o equilíbrio estático de forças em duas direções ortogonais e/ou de momentos.

Figura 1- Forças normais e de corte numa fatia genérica



Fonte: Silva (2011 apud Almeida, 2016)

A técnica de equilíbrio limite é bastante aceita devido a simplicidade do método, a boa acurácia dos resultados e o baixo custo na obtenção dos parâmetros de resistência do solo com uma boa precisão (THOMAZ, 1984).

### 2.3.1. Tipos e causas de Instabilidade de Taludes

Ao se iniciar o estudo das análises de estabilidade é conveniente tratar das causas que podem levar os taludes a instabilidade. Estas causas são complexas, pois envolvem uma infinidade de fatores que se associam e entrelaçam (PEREIRA, 2013).

O movimento dos maciços de terras depende da resistência interna do solo e/ou de solicitações externas aplicadas. (TERZAGHI, 1943).

Segundo Varnes (1978) os movimentos de terra são separados em três categorias:

- Os desmoronamentos: movimentos rápidos, resultantes da ação da gravidade sobre a massa de solo que se destaca do restante do maciço e rola talude abaixo.
- Os escorregamentos: processo de formação de uma cunha de solo, com superfície bem definida, mas sem separação com o resto do maciço.
- Os rastejos ou fluimentos: movimentos lentos, semelhantes aos desmoronamentos, em ação, mas sem formação de uma divisão nítida entre a parte destacada e a superfície restante.

Dentre as causas de instabilidades nessas estruturas, Terzaghi (1952) separa em 3 camadas:

1. Causas externas – ações externas que alteram o estado de tensão, resultando em um cisalhamento que iguala ou supera a resistência ao cisalhamento, levando o maciço à ruptura. Podem ocorrer devido ao aumento da inclinação do talude, deposições de material ao

longo da crista do talude, efeitos sísmicos, cortes no pé do talude, etc.;

2. Causas internas – ações internas reduzem a resistência ao cisalhamento. Podem ocorrer devido ao intemperismo/decomposição, erosão interna, decréscimo da coesão, etc;

3. Causas intermediárias – ações na fundação do maciço devido à elevação ou rebaixamento do lençol freático, elevações do artesianismo, empuxo hidrostático da água preenchendo fendas verticais, liquefação espontânea, etc.

Vale ressaltar que, dentre as causas externas, os processos como o de intemperismo levam a um enfraquecimento do meio, com consequente redução dos parâmetros de resistência, como a coesão e o ângulo de atrito interno (GUIDICINI; NIEBLE, 2016).

### 2.3.2. Parâmetros do solo

Como foi visto no tópico anterior, os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, como ângulo de atrito interno e coesão, são fundamentais para o bom desempenho do maciço.

Segundo Almeida e Oliveira (2018),

Dentre diversos parâmetros de importância do solo, os relacionados ao cisalhamento de solos destacam-se devido a sua importância geotécnica, na análise de estabilidade de taludes, dimensionamento de contenções e muros de arrimo, entre outros. Tais parâmetros podem ser obtidos através de ensaios de cisalhamento direto ou triaxiais, além de poderem ser estimados através de dados de sondagem SPT.

Assim, verificou-se na literatura as faixas de valores desses parâmetros para cada tipo de solo. A Tabela 2 apresenta os resultados de compactação e resistência de 1500 ensaios geotécnicos feitos pelo U.S BUREAL OF RECLAMATION e apresentados em Carvalho (1983) e Leme (2006).

Tabela 2-Resultado de 1500 ensaios realizados pelo U.S BUREAL OF RECLAMATION

Classificação do solo	Compactação - Proctor		Resistência ao cisalhamento		
	$\gamma_g$	H (%)	C'(kPa)	C' sat (kPa)	$\phi(^{\circ})$
GW	>19	<13,0	(x)	(x)	>38,3
GP	>17,6	<12,4	(x)	(x)	>36,5
GM	>18,2	<14,5	(x)	(x)	>33,8
GC	>18,4	<14,7	(x)	(x)	>31,0
SW	$19,0 \pm 0,8$	$13,3 \pm 2,5$	$40,0 \pm 4,0$	(x)	$38,6 \pm 1,2$
SP	$17,6 \pm 0,3$	$12,4 \pm 1,0$	$23,0 \pm 6,0$	(x)	$36,5 \pm 1,2$
SM	$18,2 \pm 0,2$	$14,5 \pm 0,4$	$52,0 \pm 6,0$	$20,0 \pm 7,0$	$33,8 \pm 1,2$
SM-SC	$19,0 \pm 0,2$	$12,8 \pm 0,5$	$51,0 \pm 2,0$	$14,0 \pm 6,0$	$33,4 \pm 4,0$
SC	$18,4 \pm 0,2$	$14,7 \pm 0,4$	$76,0 \pm 2,0$	$11,0 \pm 6,0$	$31,0 \pm 4,0$
ML	$16,5 \pm 0,2$	$19,2 \pm 0,7$	$68,0 \pm 1,0$	$9 \pm (x)$	$31,8 \pm 2,3$
ML-CL	$17,4 \pm 0,3$	$16,8 \pm 0,7$	$64,0 \pm 2,0$	$22 \pm (x)$	$31,8 \pm 3,4$
CL	$17,3 \pm 0,2$	$17,3 \pm 0,3$	$88,0 \pm 1,0$	$12,0 \pm 2,0$	$28,4 \pm 2,3$
OL	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)
MH	$13,1 \pm 0,6$	$36,3 \pm 3,2$	$36,3 \pm 3,2$	$20,0 \pm 9,0$	$25,2 \pm 2,9$

Tabela 2-Resultado de 1500 ensaios realizados pelo U.S BUREAL OF RECLAMATION

Classificação do solo	Compactação - Proctor			Resistência ao cisalhamento	
	$\gamma_g$	H (%)	C'(KPa)	C' sat (KPa)	$\phi(^{\circ})$
CH	$15,0 \pm 0,3$	$25,5 \pm 1,2$	$25,5 \pm 1,2$	$11,0 \pm 6,0$	$19,3 \pm 5,1$
OH	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)

Fonte: Carvalho (1993) apud Leme (2006).

### 2.3.3. Determinação do fator de segurança

Quando se trata da geotécnica, o fator ou coeficiente de segurança pode ser definido como a razão entre esforços estabilizantes (resistentes) e esforços instabilizantes (atuantes) (VANMARCKE, 2011).

A análise de estabilidade clássica equilíbrio limite (e.g., Fellenius, 1936; Bishop, 1955) considera uma seção transversal e define o fator de segurança  $F_s$  como a razão entre o momento resistente e o momento atuante (VANMARCKE, 2011). Em geral, as análises são realizadas comparando-se as tensões cisalhantes mobilizadas com resistência ao cisalhamento. Com isso, define-se um fator de segurança dado pela Equação 1.

$$FS = \frac{\tau_{resist}}{\tau_{mob}} \quad (1)$$

Onde:

$FS$  = fator de segurança

$\tau_{resist}$  = resistência ao cisalhamento do solo

$\tau_{mob}$  = tensão cisalhante atuante

Na prática, há diversos valores de  $FS$  tabelados ou pré-definidos, tais como:

- O “Corps of Engineers” estipula o  $FS$  entre 1,3 e 1,4.
- A Norma ABNT, NBR 11682/2009 – Estabilidade de encostas estabelece os valores apresentados na Tabela 3.

Tabela 3-Fatores de segurança mínimos para deslizamentos

Nível de Segurança contra danos a vidas humanas	Alto	Médio	Baixo
	Nível de Segurança contra danos materiais e ambientais		
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Fonte: NBR 11682/2009

O mesmo é estabelecido pela Norma ABNT, NBR 9061/1985 – Segurança de escavação a céu aberto – esta norma define que para os casos gerais, os coeficientes de segurança devem atingir no mínimo o valor de 1,5 (ABNT, 1985).

Entretanto, vale a ressalva que segundo Das e Sobhan (2014 apud MACHADO e MOREIRA, 2020) o fator de segurança não é permanente, alterando seu valor ao longo do tempo devido a mudanças de carregamento na superfície do talude, interferindo no ângulo de atrito e coesão. Com isso, a etapa de dimensionamento de um talude deve levar em conta alterações futuras de seus componentes que poderiam levar a estrutura a situações críticas, necessitando de cálculos que viabilizem a estabilidade do maciço ao longo do período. possibilitando que o maciço não perca a propriedade de manter-se estável ao longo do período.

Além disso, nem todo maciço encontra-se em uma situação de alto risco seja para segurança humana ou ambiental, sendo, por vezes, plausível o uso de fatores de segurança menores, dentre os permitidos pela norma.

#### **2.3.4. Métodos para cálculo de estabilidade de talude**

Nesta área, há uma grande variedade de métodos propostos, cuja acurácia varia como função das hipóteses consideradas. Segundo Horst (2007) estes métodos podem ser divididos em dois grupos: métodos para análise de superfícies circulares, e métodos para análise de superfícies quaisquer.

Outra abordagem de divisão é vista quando Almeida (2016) afirma que os métodos baseados na teoria do equilíbrio limite podem ser divididos em:

- a) Não rigorosos: Métodos que não satisfazem integralmente as premissas de equilíbrio estático global ou para as fatias individuais;
- b) Rigorosos: Métodos que satisfazem integralmente estas condições de equilíbrio e, assim, teoricamente fornecem resultados mais confiáveis.

Dentre os métodos, Leite e Lins (2017) afirma que os métodos mais utilizados para análises de estabilidade do talude são o método de Bishop Simplificado e o método de Morgenstern&Price.

Em 1955, Bishop deduziu um método para análises de taludes, no qual ficou conhecido como método Bishop simplificado. O método foi formulado para superfícies de ruptura circular, mas pode ser adaptado para outras superfícies (FIORI, 2015). No entanto, este método negligencia as forças verticais entre lamelas e não leva em conta as condições de equilíbrio de forças horizontais, tendo como princípio, somente o equilíbrio de momentos

(ZHU, 2018).

Segundo Silva (2010), o método simplificado de Bishop, possui erro associado a métodos mais rigorosos e precisos, no valor máximo de 7%, sendo, na maioria dos casos inferior a 2%, sendo este, um dos motivos da sua grande aplicação.

Um método originalmente feito para superfícies circulares, mas que pode ser modificado para superfícies não circulares é o método de Spencer (1967). Nele, desenvolveu-se duas equações de fator de segurança; uma em relação ao equilíbrio de momento e outra em relação ao equilíbrio de força horizontal. Adotou-se uma relação constante entre o cisalhamento entre fatias e as forças normais, e através de um procedimento iterativo alterou o cisalhamento entre fatias para a razão normal até que os dois fatores de segurança fossem os mesmos. Encontrando uma razão cisalhamento-normal que torna os dois fatores de segurança iguais, representando que o equilíbrio do momento e da força são satisfeitos (USACE, 2003 apud PEREIRA, 2013).

Assim, Spencer (1967) assume uma função de força entre fatias constante, considerando momentos e força de equilíbrio, além de considerar forças de cisalhamento e normais entre fatias.

Morgenstern e Price (1965) desenvolveram um método semelhante ao método de Spencer, mas permitindo várias funções de força entre fatias. Gerscovich (2009) fala que este método é o mais geral dentre os métodos de equilíbrio limite para uma superfície qualquer.

. Quanto ao uso desses métodos, pode-se afirmar que:

Para projetos preliminares e classificados com risco desprezível, o tempo consumido em análises detalhadas não é justificado. Recomenda-se, nesses casos, o uso de métodos convencionais e simplificados, como superfícies circulares de ruptura.( ex.: Bishop simplificado).Para projetos classificados como risco pequeno a médio, recomenda-se o uso de métodos simplificados com superfície de ruptura não circulares (ex.: Janbu, 1973), ou métodos rigorosos (ex.: Morgenstern&Price, 1965) e para projetos de risco elevado, são requeridos estudos geológicos e geotécnicos mais detalhados da área e análises rigorosas de estabilidade (ex.: Morgenstern&Price, Spencer ou Sarma).(LEITE e LINS, 2017, p.24-25).

## 2.4. Modelagem estatística

Na engenharia, é comum a realização de análises de dados, com o objetivo de observar fenômenos ocorridos e avaliar como estes se apresentam frente às variáveis que influenciam em seu comportamento. Para isso recorre-se da Estatística, definida como “[...] a ciência do planejamento de estudos e experimentos, da obtenção de dados, e em seguida, da organização, resumo, apresentação, análise, interpretação e elaboração de conclusões com base nos dados.” (TRIOLA, 2013, p. 4).

A compreensão sobre os métodos estatísticos adequados a cada situação acarreta

na minoração dos erros na etapa de resultados e nas interpretações dos mesmos. A análise de regressão linear, por exemplo, analisa a relação de uma variável dependente com uma ou mais variáveis independentes.

Segundo Zeviani, Júnior e Bonat (2013),

“[...]os modelos de regressão linear e não-linear são usados para descrever o comportamento de uma variável aleatória (v.a.) Y como uma função de condicionantes x chamadas de variáveis explicativas, covariáveis ou estímulos. Com tais modelos busca-se encontrar e descrever padrões de homogeneidade dentre a heterogeneidade observada em um conjunto de observações de Y.”

Segundo Morettin e Bussab (2013, p. 482), “Quando usamos modelos de regressão, [...] a situação ideal é aquela em que o pesquisador, por razões teóricas inerentes ao problema real sob estudo, pode sugerir a forma funcional da relação entre duas ou mais variáveis.”

Assim, no modelo de regressão linear, uma ou mais variáveis independentes são utilizadas para prever a variável dependente. “A natureza da relação entre [...] variáveis pode assumir inúmeras formas, abrangendo desde funções matemáticas simples até funções matemáticas extremamente complicadas.” (LEVINE; STEPHAN; SZABAT, 2017, p. 474).

Entretanto, quando a estimativa de alguma variável, através do modelo linear, não satisfaz as condições de normalidade e linearidade, faz-se o uso do modelo de regressão não-linear. Para Mattos (2013, p. 16), o modelo de regressão não-linear “[...] é frequentemente utilizado por pesquisadores em diversas áreas do conhecimento, tais como, agricultura, engenharia, química, etc.”

## 2.5. Conceitos gerais de solos não saturados

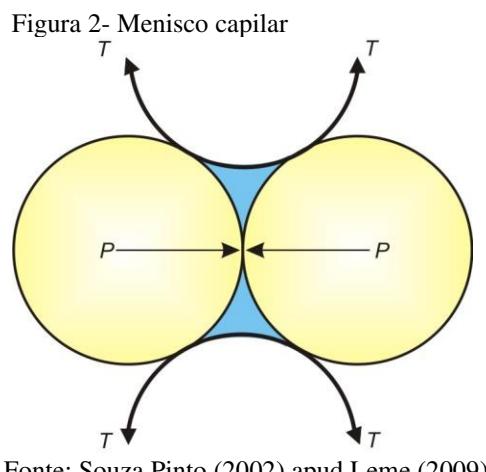
Um solo saturado é formado por duas fases: uma fase sólida constituída pelos grãos do solo, e uma fase líquida constituída pela água (podendo-se acrescentar nesta fase sais minerais e ar dissolvidos). Porém, quando o solo está em seu estado não saturado, outras fases são consideradas. Lambe & Whitman (1969) propuseram que a estrutura do solo não saturado é constituída por um sistema trifásico, formado por uma fase sólida (partículas e minerais), por uma fase líquida (em geral, água) e por uma fase gasosa (ar). Fredlund e Morgenstern (1977) propuseram a introdução de uma quarta fase independente, formada pela interação entre a fase gasosa não dissolvida e a fase líquida, conhecida como membrana contrátil ou película contrátil.

Uma das particularidades da membrana contrátil é a ocorrência de resistência a

tração, sendo causado pelo surgimento de uma tensão nos materiais contíguos, denominada de tensão superficial.

A tensão superficial surge por conta da interface água-ar, criando o comportamento de uma membrana elástica. Se a fase gasosa presente no solo também for contígua, esta membrana elástica interage com o ar e partículas sólida, influenciando diretamente no comportamento mecânico do solo.

Outra influência da tensão superficial é com relação a água existente entre os grãos do solo, pois neste caso ocorre uma interfase sólido/líquido/gás, formando-se uma superfície curva no líquido denominada de menisco capilar. A Figura 2 exemplifica este fenômeno.



Fonte: Souza Pinto (2002) apud Leme (2009)

Nessas condições, a água intersticial encontra-se submetida à pressão inferior à atmosférica, e os meniscos existentes entre os grãos exercem sobre estes uma força de aproximação, sendo responsável pelo aumento da tensão efetiva do solo.

A presença dos meniscos capilares no solo tende a aproximar as partículas, aumentando a força entre os grãos do solo e surgindo o que se chama de coesão aparente. A coesão aparente é frequentemente referida às areias, pois estas podem secar e se saturar com facilidade. Porém, é nas argilas que elas atingem valores maiores, sendo responsável pela estabilidade de muitos taludes. Épocas chuvosas reduzem e até eliminam esta coesão aparente, por isto que se tem muitas ocorrências de rupturas de taludes nestes períodos (Souza Pinto, 2002).

### 2.5.1. Sucção

Marinho (2000) cita a sucção como sendo “a pressão hidrostática da água intersticial, fruto de condições físico-químicas, que faz com que o sistema água/solo absorva

ou perca água, dependendo das condições ambientais, aumentando ou reduzindo o grau de saturação". Ou seja, em outras palavras, a sucção é uma tensão usada para avaliar a capacidade do solo de reter água.

A sucção total presente num solo é constituída por duas parcelas, denominados de sucção matricial e sucção osmótica

É importante destacar que Edil et al. (1981) comprovou que, essencialmente, apenas a sucção mátrica afeta o comportamento do solo não saturado. Fredlund e Morgenstern (1977), também mostram que a sucção mátrica é o suficiente para descrever o comportamento geomecânico dos solos não saturados.

### 2.5.2. Resistência ao cisalhamento em solos não saturados

Os estudos relacionados ao comportamento da resistência ao cisalhamento de solos não saturados iniciaram-se no século XX através de Haines (1925), que apresentou um estudo a respeito das influências das tensões capilares sobre a resistência dos solos. Posteriormente, surgiram clássicos estudos sobre a resistência dos solos não saturados, como por exemplo Bishop (1959), Fredlund et al. (1978).

Dentre os diversos estudos realizados, Bishop (1959) propôs que as tensões efetivas em solos não saturados envolvem de maneira simplificada a equação clássica de Terzaghi, sendo apresentada na forma da equação 2.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (2)$$

Em que:

$\sigma'$  = Tensão efetiva

$u_a$  = Poro-pressão do ar

$(\sigma - u_a)$  = Tensão líquida

$(u_a - u_w)$  = Sucção matricial

$c$  = Parâmetro função do grau de saturação do solo.

O parâmetro  $c$  tem o seu valor igual a zero para os solos totalmente secos, e igual a 1 para solos totalmente saturados. Como se pode notar, a equação proposta por Bishop (1959) se reduz para a equação de tensões efetivas de Terzaghi quando o solo está completamente saturado.

A magnitude do parâmetro  $\chi$  varia em função do tipo de solo e da sua estrutura,

para um mesmo grau de saturação.

Quando aplicado o critério de Mohr-Coulomb para a proposta de tensões efetivas de Bishop (1959), a resistência ao cisalhamento dos solos não saturados é definida segundo a Equação 3.

$$\tau_r = c' + [(\sigma - u_a)_r + \chi(u_a - u_w)_r] \tan\phi' \quad (3)$$

Onde:

$\tau_r$  = resistência ao cisalhamento não saturado na ruptura;

$c'$  e  $\phi'$  = parâmetros efetivos de resistência do solo saturado;

$(\sigma - u_a)_r$  = tensão normal líquida atuante no plano de ruptura, na ruptura;

$(u_a - u_w)_r$  = sucção mátrica na ruptura.

Tendo em vista a dificuldade da determinação experimental do parâmetro  $\chi$ , Fredlund et al. (1978) propuseram a Equação 4 para a determinação da resistência ao cisalhamento dos solos na condição não saturada, considerando o conceito de variáveis de tensão:

$$\tau_r = c' + (\sigma - u_a)_r \tan\phi' + (u_a - u_w)_r \tan\phi^b \quad (4)$$

Onde:

$\phi^b$  = parâmetro que quantifica o acréscimo de resistência relativo ao aumento de sucção.

Ao comparar as equações apresentadas de Fredlund et al. (1978) e Bishop (1959), pode-se observar que ambas são muito semelhantes, apesar de serem conceitualmente diferentes. Pelas equações, é possível correlacioná-las segundo a Equação 5.:

$$\tan\phi^b = \chi \tan\phi' \quad (5)$$

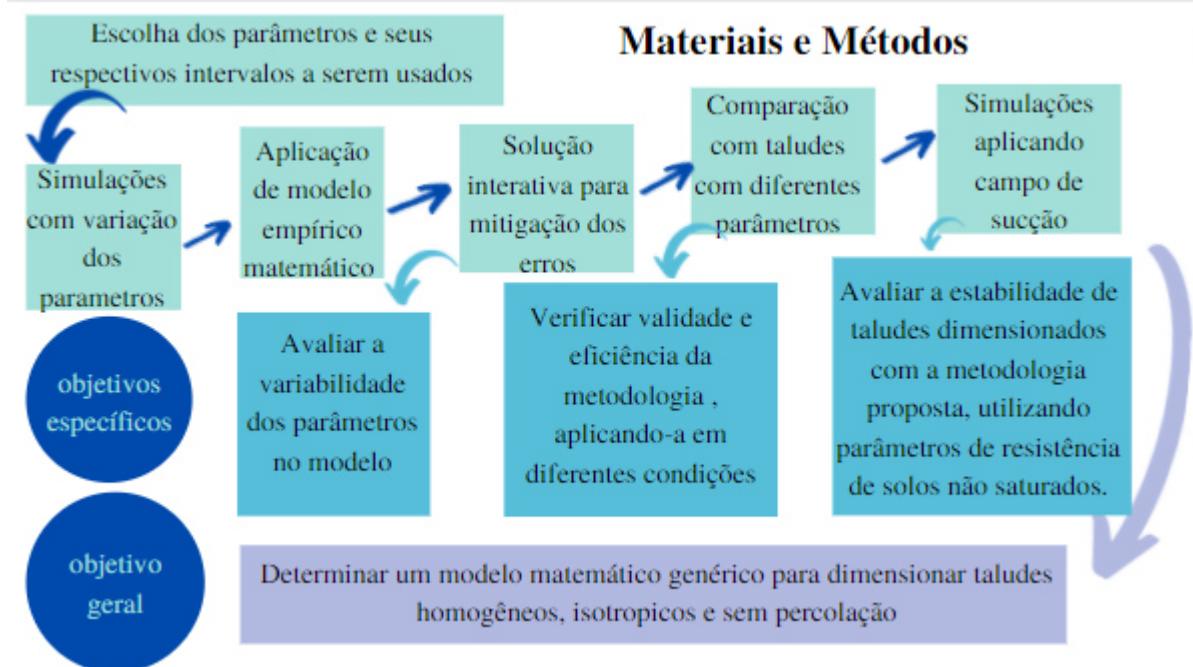
Na prática o parâmetro  $\phi^b$  é experimentalmente mais fácil de ser determinado do que parâmetro  $\chi$ . Este fato explica porque a proposta de Fredlund et al. (1978) é a mais difundida atualmente na avaliação da resistência ao cisalhamento dos solos não saturados.

Na grande maioria dos trabalhos encontrados na literatura, existe um consenso de que o ângulo  $\phi^b$  é menor que o ângulo  $\phi'$ . Porém, segundo Krahn (2004), de forma prática,  $\phi^b$  pode ser considerado como igual a  $\phi'/2$ .

### 3. MATERIAIS E METODOS

A sequência de métodos empregada neste trabalho, enfatizando a realização de cada um de seus objetivos, seguirá a seguinte ordem apresentada na Figura 3.

Figura 3-Fluxograma de Metodologia do Trabalho



Fonte: Autoral.

#### 3.1. Estudos de Estabilidade de Taludes

Para o desenvolvimento desta pesquisa, utilizou-se o módulo SLOPE/W (GeoStudio 2021.4) para o uso de elementos finitos em análises de estabilidade em qualquer configuração de talude proposta.

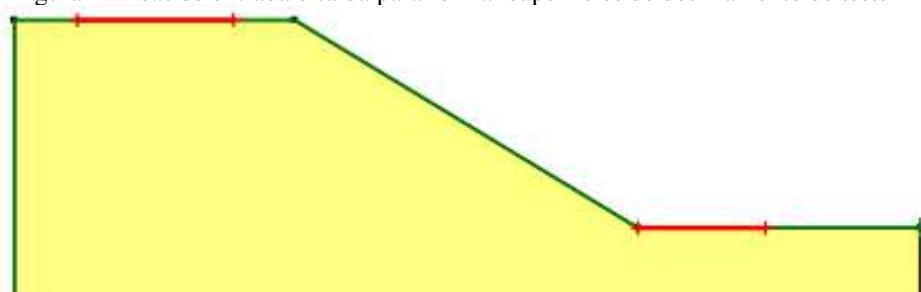
Diante disso, determinar a posição da superfície de escorregamento crítica com o menor fator de segurança é um dos principais problemas em uma análise de estabilidade. Como é bem conhecido, encontrar a superfície de deslizamento crítica envolve um processo interativo em que uma possível superfície de deslizamento é determinada e o fator de segurança associado é calculado. Isso é repetido por muitas superfícies de deslizamento possíveis e, no final, a superfície de deslizamento de teste com o menor fator de segurança é considerada a superfície governante ou de deslizamento crítica.

Dentre os tipos de superfície de deslizamento, as de ensaio circular são ligadas às primeiras formulações e técnicas de equilíbrio limite. Entretanto, uma das dificuldades dessa formulação é visualizar as extensões e a gama de superfícies de deslizamento de teste. Essa

limitação pode ser superada especificando o local onde as superfícies de deslizamento de teste provavelmente entrarão na superfície do solo e de onde sairão. Esta técnica é chamada de método de entrada e saída no SLOPE/W.

Na Figura 4, há duas linhas grossas (vermelhas) ao longo da superfície do solo. Estas são as áreas onde as superfícies deslizantes entrarão e sairão.

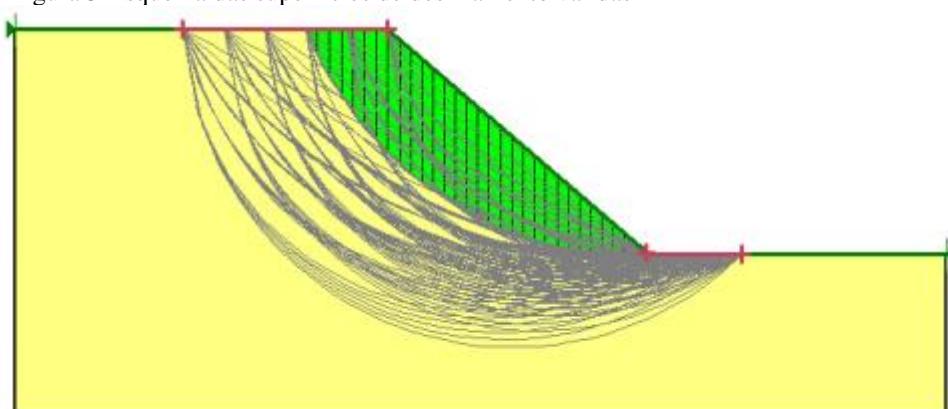
Figura 4-Áreas de entrada e saída para formar superfícies de deslizamento de teste



Fonte: Autoral.

Com isso, a Figura 05 mostra todas as superfícies de deslizamento válidas com certos dados de entrada, saída e raio. A superfície crítica é a área sombreada.

Figura 5-Esquema das superfícies de deslizamento válidas



Fonte: Autoral.

Assim, definindo-se a superfície de deslizamento, o que define um certo ângulo de inclinação, o programa calcula o fator de segurança da estrutura. Para isso, é necessário que parâmetros como coesão, ângulo de atrito, altura do talude e peso específico sejam determinados.

Para este estudo, adotou-se como regra o fator de segurança de 1,5, por ser o mais indicado pelas bibliografias.

### 3.2. Parâmetros Geotécnicos

Assim, o trabalho consistiu em simular inclinações que chegassem a um  $FS = 1,5$  para dados valores dos parâmetros geotécnicos e geométricos do talude. Para isso, os parâmetros foram variados segundo a Tabela 4:

Tabela 4-Lista de Parâmetros Adotados

Parâmetro	Intervalo	Variabilidade
Peso Específico Natural(kN/m <sup>3</sup> )	15 a 21	2
Ângulo de atrito(°)	20 a 45	5
Coesão (KPa)	2 a 32	5
Altura (m)	6 a 18	4

Fonte: Autoral.

### 3.3. Analise Estatística para Determinação do Equacionamento

Após a obtenção dos dados pelas simulações, a próxima etapa é analisar o comportamento desses parâmetros em função da inclinação. Tal análise estatística para a obtenção de correlações entre os parâmetros foi realizada com o uso do software Microsoft® Excel.

Dito isso, adotou-se o modelo de regressão não-linear da Equação 6.

$$\alpha = A(\gamma_n)^k + B(\phi')^l + C(c')^m + D(H)^n \quad (6)$$

onde,

A, B, C e D são coeficientes;

K, l, m e n são coeficientes de potenciação;

$\gamma_n$  é o peso específico natural em kN/m<sup>3</sup>;

$\phi'$  é o ângulo de atrito em graus;

$c'$  é a coesão em KPa;

H é a altura em metros.

Foi atribuído para os coeficientes (A, B, C e D) e coeficientes de potenciação (k, l, m e n) o valor inicial de 1,00. Após isso, fez-se os cálculos para todos os 632 conjuntos de dados, avaliando o erro para cada um, permitindo a obtenção do erro médio de toda a amostra segundo a Equação 7.

$$Erro\ medio = \frac{\alpha_{simulado} - \alpha_{calculado}}{numero\ de\ simulações} \quad (7)$$

Empregando a ferramenta Solver do Microsoft® Excel, atribuiu-se a todos os coeficientes e potências da expressão a condição de variáveis, de forma que a ferramenta solucionasse iterativamente o problema, para que o somatório do erro de todos os 632 conjuntos de dados fosse o menor valor possível.

### **3.4. Verificação da validade e eficiência da metodologia proposta**

Para a validação do modelo, o processo foi dividido em três etapas: análises com simulações utilizando os dados apresentados Tabela 2, simulações com dados fora do intervalo de valores utilizados e simulações utilizando dados reais provindos do trabalho de Lehmkuhl e Abreu (2021). Assim, foi realizado, em todas as análises, o cálculo do FS para parâmetros de solo saturados e não saturados. Sendo feito, para o segundo caso, a consideração de  $\phi_b$  igual à  $\phi'/2$ .

#### **3.4.1. Simulações adotando os dados do U.S BUREAL OF RECLAMATION**

Na primeira etapa, foram selecionados valores aleatórios, por meio da função aleatório do Microsoft Excel, dentre as faixas de valores apresentadas na Tabela 2 e realizadas 4 simulações para cada tipo de solo. Sendo utilizado apenas os solos com dados suficientes, descartando-se os solos GW, GP, GM, GC, SW, SP, OL e OH.

Além disso, para o parâmetro altura, foram estabelecidos, dentro da faixa de valores do trabalho, intervalos para cada simulação da seguinte forma:

- a) 1<sup>a</sup> simulação: altura entre 6 e 9 metros;
- b) 2<sup>a</sup> simulação: altura entre 9 e 12 metros;
- c) 3<sup>a</sup> simulação: altura entre 12 e 15 metros;
- d) 4<sup>a</sup> simulação: altura entre 15 e 18 metros.

#### **3.4.2. Simulações com dados fora do intervalo**

Na segunda etapa, tomou-se um conjunto de dados como simulação controle, com os valores médios dos parâmetros utilizados no trabalho, apresentados na Tabela 5 abaixo.

**Tabela 5- Valores de Parâmetro adotados para a análise controle**

H (m)	C' (KPa)	Fi' (°)	Gama (KN/m <sup>3</sup> )
12	20	32	18

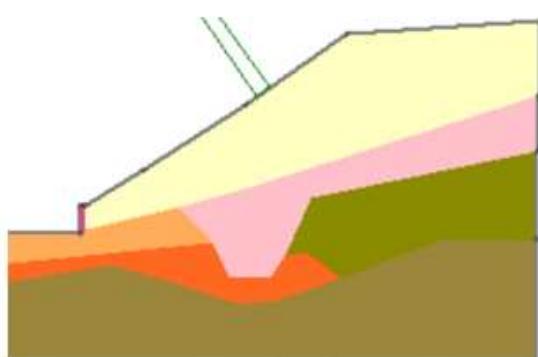
Fonte: Autoral.

Após isso, variou-se cada parâmetro para valores menores e maiores daqueles utilizados.

### 3.4.3. Simulações com os dados de Lehmkuhl e Abreu (2021)

Por fim, para esta parte do estudo, foi utilizado como base o maciço usado no estudo de Lehmkuhl e Abreu (2021) e ilustrado na Figura 6. Entretanto, a fim de simplificar a análise e torná-la mais próxima das condições utilizadas neste trabalho, visto que o mesmo foi feito com taludes com um único tipo de solo, a reprodução do talude em questão foi feita com apenas dois tipos de solo por vez e dividindo-os de forma igual no maciço.

Figura 6-Talude de Lehmkuhl e Abreu (2021).



Material	Cor	Peso específico (kN/m³)	Coesão (kPa)	Fi (°)
Silte argilo arenoso	Amarelo	17	0	35,8
Argila arenosa média	Rosa	17	50	7,33
Argila mole	Laranja	15	25	30
Argila arenosa dura	Marrom	21	200	40
Silte arenoso	Verde	20	80	43,5
Impenetrável	Marrom escuro	20		
Muro	Vermelho	20		

Fonte: modificado de Lehmkuhl e Abreu (2021).

Assim, no caso 1, foram utilizados os solos em amarelo, “Silte argilo arenoso”, e em rosa, “Argila arenosa média”. Sendo o talude original com 12 metros de altura e considerando 1 metro de solo abaixo no nível do talude, esses 13 metros foram divididos igualmente na simulação e para a utilização dos dados na equação, foi considerado uma ‘camada única’ utilizando os valores médios, como mostrado na Tabela 6 abaixo.

Tabela 6-Dados da validação do caso 1 do talude de Lehmkuhl e Abreu (2021).

Camada	H (m)	C' (kPa)	Fi' (°)	Gama (kN/m³)
superior	6,5	0	35,8	17
inferior	6,5	50	7,33	17
Camada única	12	25	21,57	17

Fonte: Autoral.

Para o caso 2, seguiu-se a mesma metodologia, mas com o solo inferior sendo o solo “argila mole” (em laranja na Figura 6) e chegou-se nos dados apresentados na Tabela 7.

Tabela 7-Dados da validação do caso 2 do talude de Lehmkuhl e Abreu (2021)

Camada	H (m)	C' (kPa)	Fi' (°)	Gama (kN/m³)
superior	6,5	0	35,8	17
inferior	6,5	25	30	15
Camada única	12	12,5	32,9	16

Fonte: Autoral.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos nessa pesquisa.

### 4.1. Modelo Matemático para Estimativa do Ângulo de Inclinação do Talude

Com base na metodologia, o modelo matemático para determinação do ângulo de inclinação de taludes para a condição estável foi determinado pela Equação 8.

$$\alpha = -0,554 * \gamma^{-8,843} + 0,012 * \phi'^{2,058} + 0,823 * c'^{1,105} + 461,517 * H^{-1,608} \quad (8)$$

Onde,

$\gamma$  é o peso específico natural em kN/m<sup>3</sup>;

$\phi'$  é o ângulo de atrito em graus;

$c'$  é a coesão em KPa;

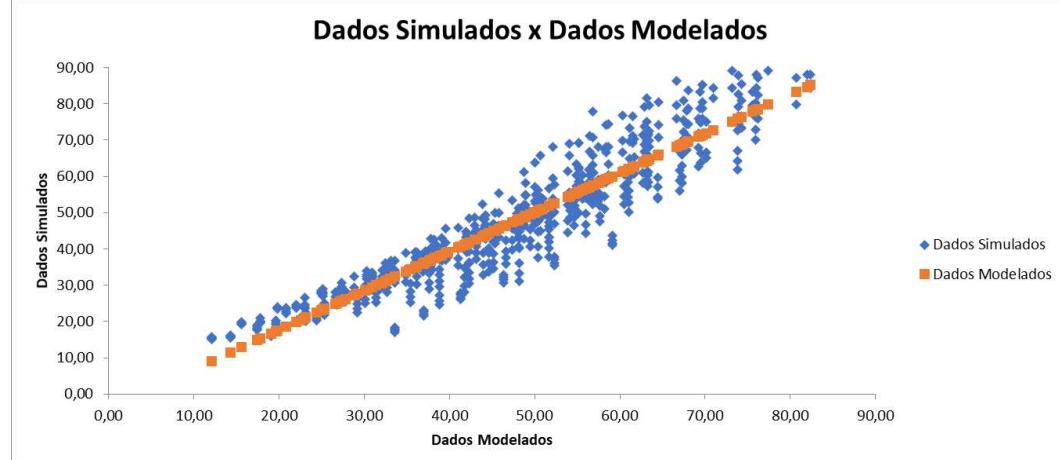
$H$  é a altura em metros.

As tabelas de dados geradas nas simulações encontram-se no Apêndice A e a tabela de análise para determinação da equação encontra-se no Apêndice B.

#### 4.1.1. Analise Estatística do Modelo

Ao se fazer uma análise de regressão do modelo em relação aos dados simulados chega-se a um  $R^2 = 0,87$ , como mostrado na Figura 7.

Figura 7-Regressão Dados Simulados x Dados Modelados

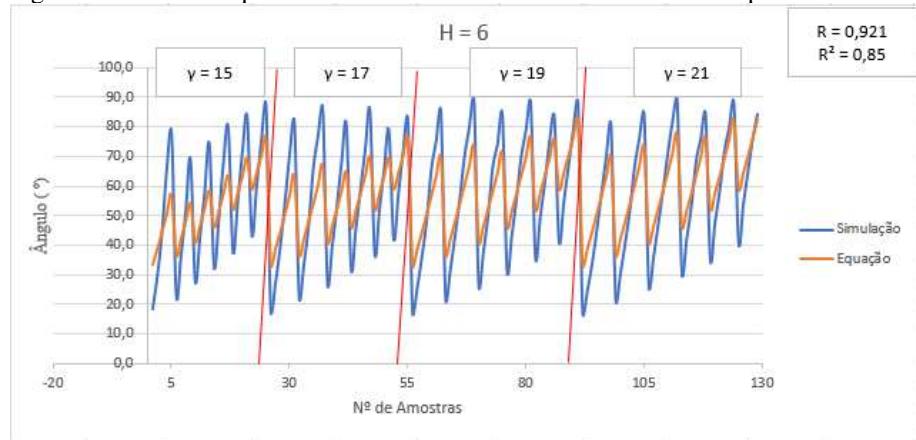


Fonte: Autoral.

Entretanto, devido a grande quantidade de dados, análises em trechos menores tornam a avaliação do modelo mais precisa.

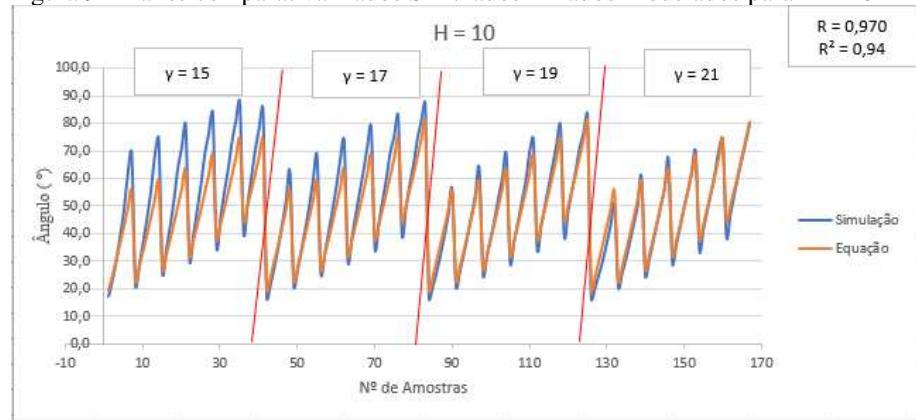
As Figuras 8, 9, 10 e 11 são comparações dos dados simulados com os mesmos parâmetros, aplicados na equação, além de conterem os valores dos seus respectivos  $R$  e  $R^2$  na análise de regressão desses dados.

Figura 8-Análise comparativa Dados Simulados x Dados Modelados para  $H = 6$



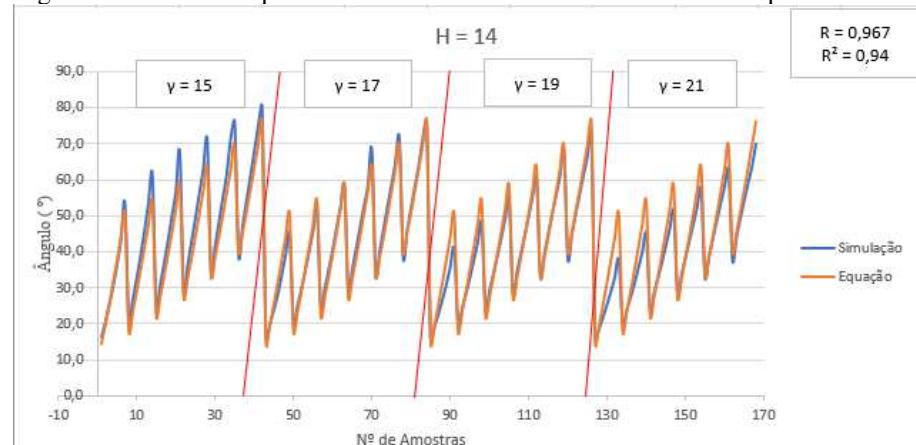
Fonte: Autoral.

Figura 9-Análise comparativa Dados Simulados x Dados Modelados para  $H = 10$

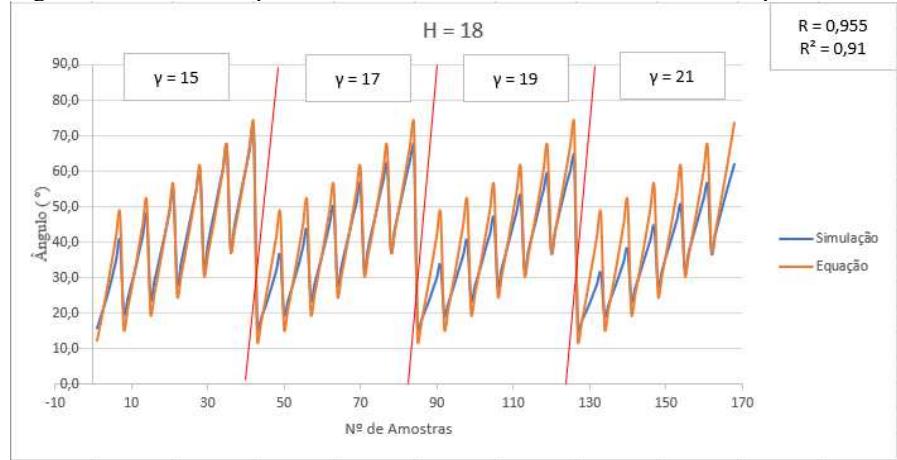


Fonte: Autoral.

Figura 10-Análise comparativa Dados Simulados x Dados Modelados para  $H = 14$



Fonte: Autoral.

Figura 11-Análise comparativa Dados Simulados x Dados Modelados para  $H = 18$ 

Fonte: Autoral.

Para uma melhor análise desses gráficos, é preciso explicar algumas de suas características. Primeiro, foram destacadas 4 subdivisões devido cada peso específico utilizado e dentro de cada uma destas há, em geral, 6 ciclos devido aos 6 valores de ângulo de atrito utilizados (20, 25, 30, 35, 40 e 45) e, em cada um destes, a variação de valores ocorre devido ao aumento da coesão (2, 7, 12, 17 e 22).

Dito isso, é possível notar, tanto pelos gráficos, quanto pelos valores de  $R$  e  $R^2$ , que o modelo se aproxima mais da realidade em alturas entre 10 e 14 metros. Porém, à medida que a altura diminui o modelo tende a se distanciar da realidade, tendo menores valores de  $R$  e  $R^2$  e, graficamente, mostrando-se ser menos sensível à variação da coesão. Já em alturas maiores, a diminuição dos valores de correlação se mantém, mas com uma maior sensibilidade à variação da coesão.

#### 4.1.2. Analise das Variabilidade dos Parâmetros do Modelo

Como visto no tópico anterior, uma análise dos efeitos da variação de cada parâmetro nos valores da inclinação na condição estável se torna necessária para um melhor estudo.

Dito isso, foi calculado o erro percentual médio absoluto entre os valores simulados e os dados pela equação, analisando cada parâmetro separadamente, como mostrado nas Tabelas 8, 9 e 10.

Tabela 8-Erro percentual médio absoluto entre os dados simulados e modelados em relação a coesão

	$h = 6$	$h = 10$	$h = 14$	$h = 18$	MÉDIA
$C' = 2$	56,33%	10,51%	5,25%	12,39%	21,54%
$C' = 7$	23,38%	5,48%	4,63%	6,37%	9,96%
$C' = 12$	8,92%	6,23%	5,24%	4,38%	6,19%

Tabela 8-Erro percentual médio absoluto entre os dados simulados e modelados em relação a coesão

	h = 6	h = 10	h = 14	h = 18	MÉDIA
C' = 17	10,53%	7,42%	6,74%	7,93%	8,16%
C' = 22	12,28%	8,86%	7,99%	11,76%	10,22%
MÉDIA	22,29%	7,70%	6,27%	8,61%	11,22%

Fonte: Autoral.

Tabela 9-Erro percentual médio absoluto entre os dados simulados e modelados em relação ao ângulo de atrito

	h = 6	h = 10	h = 14	h = 18	MÉDIA
Fi' = 20	32,81%	12,06%	12,89%	22,61%	20,09%
Fi' = 25	24,70%	8,16%	9,23%	14,40%	14,12%
Fi' = 30	20,55%	8,07%	6,71%	10,23%	11,39%
Fi' = 35	18,44%	8,03%	5,86%	7,76%	10,02%
Fi' = 40	16,52%	7,36%	4,32%	5,92%	8,53%
Fi' = 45	15,31%	6,17%	4,10%	5,26%	7,71%
MÉDIA	21,39%	8,31%	7,18%	11,03%	11,98%

Fonte: Autoral.

Tabela 10-Erro percentual médio absoluto entre os dados simulados e modelados em relação ao peso específico

	h = 6	h = 10	h = 14	h = 18	MÉDIA
gama = 15	23,06%	12,61%	8,29%	6,98%	12,74%
gama = 17	22,47%	8,39%	4,91%	9,33%	11,27%
gama = 19	21,44%	6,01%	6,07%	12,30%	11,45%
gama = 21	21,06%	6,38%	9,47%	15,50%	13,10%
MÉDIA	22,01%	8,35%	7,18%	11,03%	12,14%

Fonte: Autoral.

Assim, reforçando o que já havia sido notado na análise estatística, a diferença entre os dados simulados e os dados gerados pelo modelo é maior em menores alturas, como  $H = 6$  e se aproximam mais entre os valores de  $H = 10$  e  $H = 14$ . O que se pode justificar por um simples efeito estatístico em que os dados mais extremos se tornam menos representativos. Além disso, com esses dados, é possível notar que a equação possui maior assertividade em valores de coesão intermediários, por volta de 12, e menor erro em maiores ângulos de atrito.

Ademais, o peso específico não apresentou variações significativas em sua variação. Situação que se reforça quando analisamos os seus coeficientes gerados na parcela do peso específico.

Sendo qualquer valor, quando elevado a - 8,8, se tornando muito pequeno e insignificante para a equação final. O que contrasta com a realidade, em que o peso específico possui um impacto relevante no ângulo de inclinação de taludes.

Entretanto, há dois tipos de erros, aqueles causados pelo ângulo modelado ser maior que o simulado e aqueles em que esse é menor que o ângulo simulado. Assim, apesar de cada um gerar problemas diferentes, como a maior probabilidade de instabilidade da

estrutura em casos de um maior ângulo que o necessário ou o maior dispêndio de materiais e de espaço no caso de menores ângulos, entender qual deles é mais comum para resultados da equação torna-se importante.

Dito isso, assim um novo cálculo de erro percentual foi realizado, mas levando em conta o sinal dos resultados. Com os resultados expostos nas Tabelas 11, 12 e 13.

Tabela 11-Erro percentual médio entre os dados simulados e modelados em relação a coesão

	h = 6	h = 10	h = 14	h = 18	MÉDIA
C' = 2	-56,33%	-10,51%	5,25%	12,39%	-12,30%
C' = 7	-23,38%	-3,52%	3,61%	6,16%	-4,28%
C' = 12	-4,00%	0,57%	0,78%	-0,74%	-0,85%
C' = 17	8,75%	3,53%	-1,63%	-6,75%	0,97%
C' = 22	12,28%	6,26%	-3,23%	-11,33%	0,99%
C' = 27	14,38%	8,03%	-4,10%	-15,53%	0,69%
C' = 32	15,17%	8,81%	-4,18%	-18,63%	0,29%
MÉDIA	-4,73%	1,88%	-0,50%	-4,92%	-2,07%

Fonte: Autoral.

Tabela 12-Erro percentual médio entre os dados simulados e modelados em relação ao ângulo de atrito

	h = 6	h = 10	h = 14	h = 18	MÉDIA
Fi' = 20	-18,36%	-6,32%	-9,54%	-15,04%	-12,31%
Fi' = 25	-10,08%	1,99%	-0,01%	-5,50%	-3,40%
Fi' = 30	-7,64%	5,28%	2,46%	-1,52%	-0,36%
Fi' = 35	-6,18%	5,38%	3,17%	-0,89%	0,37%
Fi' = 40	-8,58%	3,95%	1,79%	-2,02%	-1,22%
Fi' = 45	-10,80%	0,71%	-0,87%	-4,55%	-3,88%
MÉDIA	-10,27%	1,83%	-0,50%	-4,92%	-3,47%

Fonte: Autoral.

Tabela 13-Erro percentual médio entre os dados simulados e modelados em relação ao peso específico

	h = 6	h = 10	h = 14	h = 18	MÉDIA
gama = 15	-7,71%	9,76%	7,70%	1,88%	2,91%
gama = 17	-8,81%	4,08%	1,44%	-3,10%	-1,59%
gama = 19	-10,32%	-0,83%	-3,46%	-7,31%	-5,48%
gama = 21	-13,89%	-5,47%	-7,68%	-11,15%	-9,55%
MÉDIA	-10,18%	1,89%	-0,50%	-4,92%	-3,43%

Fonte: Autoral.

Com isso, pode-se notar algumas tendências:

- Em menores coesões, a equação tende a gerar ângulos maiores que o ideal. Mas, à medida que a coesão aumenta, esse efeito diminui até um ponto em que ela passa a gerar ângulos menores.
- Já na análise do ângulo de atrito, valores medianos (entre 30 e 35), em média, geram resultados próximos. Mas, para valores menores ou maiores que estes, em

ambos os casos, ângulos de inclinação maiores que o esperado são gerados.

- No caso do peso específico natural, à medida que seu valor aumenta, os valores da inclinação se tornam maiores que os simulados.
- Por fim, similar à análise anterior, entre as alturas de 10 e 14 metros, a equação gera resultados próximos aos simulados e diverge tanto em alturas maiores ou menores. Sendo em ambos os casos, com valores, em média, maiores, em especial, em menores alturas.

## 4.2. Validação do Modelo

### 4.2.1. Simulações Avaliatórias

Nesta etapa foram feitas, inicialmente, várias simulações utilizando, de forma aleatória, as faixas de valores sugeridas pelo U.S BUREAU OF RECLAMATION. Para cada tipo de solo, foram feitas 4 simulações, com cada parâmetro tendo valores aleatórios e nunca repetidos. Com exceção da coesão dos solos SM e ML-CL, que não apresentavam dados de variação. Os resultados estão mostrados na Tabela 14.

Tabela 14-Resultados de validação para cada tipo de solo

Tipo de solo	Simulação	H (m)	C' (KPa)	Fi' (°)	Gama (KN/m <sup>3</sup> )	FS saturado	FS não saturado
SM	1	8,6	20,6	33,8	18,1	1,68	3,48
	2	11,6	19,4	34,3	18,4	1,57	2,97
	3	13,3	20,3	32,8	18,0	1,53	2,76
	4	17,1	20,5	34,8	18,3	1,45	2,58
SM-SC	5	7,3	10,5	35,2	19,1	1,47	3,44
	6	11,3	12,7	33,7	18,9	1,55	2,96
	7	12,9	14,9	30,6	19,2	1,51	2,65
	8	17,9	10,8	34,1	19,0	1,53	2,69
SC	9	7,7	16,5	33,6	18,4	1,63	3,49
	10	11,7	8,6	34,0	18,3	1,56	3,07
	11	13,9	11,2	29,7	18,6	1,53	2,66
	12	17,3	13,4	34,1	18,5	1,52	2,68
ML	13	8,9	9,0	32,7	16,3	1,56	3,4
	14	9,7	9,0	32,3	16,5	1,56	3,28
	15	13,6	9,0	30,6	16,7	1,60	2,91
	16	15,3	9,0	31,3	16,6	1,62	2,88
ML-CL	17	9,0	22,0	32,6	17,4	1,69	3,43
	18	12,0	22,0	34,1	17,2	1,61	3,09
	19	12,8	22,0	31,0	17,1	1,56	2,78
	20	15,0	22,0	29,1	17,7	1,47	2,46
CL	21	7,6	10,9	27,1	17,4	1,48	3,02
	22	9,3	11,2	29,1	17,3	1,55	3,02
	23	13,9	12,8	26,4	17,5	1,52	2,52
	24	15,8	13,2	27,7	17,2	1,53	2,53
MH	25	6,0	15,4	22,4	13,4	1,83	3,73
	26	11,2	26,3	24,6	12,8	1,86	3,23
	27	13,8	17,7	22,5	12,7	1,65	2,67
	28	15,2	15,3	26,6	13,5	1,64	2,79

Tabela 14-Resultados de validação para cada tipo de solo

Tipo de solo	Simulação	H (m)	C' (KPa)	Fi' (°)	Gama (KN/m <sup>3</sup> )	FS saturado	FS não saturado
CH	29	8,7	13,0	19,8	15,2	1,49	2,56
	30	10,5	12,5	21,8	14,8	1,53	2,61
	31	12,5	8,7	24,0	15,0	1,58	2,67
	32	17,9	9,4	20,0	15,1	1,54	2,19

Fonte: Autoral.

Na análise de parâmetros de solos saturados, 27 das 32 simulações apresentaram valores do FS iguais ou superiores a 1,5 e 32 das 32 simulações apresentaram valores superiores a 1,45, representando 84% e 100%, respectivamente, dos resultados. De forma que, 4 das 5 simulações com FS abaixo de 1,5 ocorreram em alturas inferiores a 8 metros, o que corrobora com a analise anterior sobre a imprecisão em menores alturas. Entretanto, vale ressaltar que, esses resultados ainda foram muito próximos a 1,5 e, segundo a NBR 9061/1985 – Segurança de escavação a céu aberto, valores acima de 1,4 ainda são considerados para casos de risco de segurança baixo e médio, tornando esses resultados viáveis.

Já na análise com parâmetros de solos não saturados, 100% das simulações apresentaram FS superiores a 1,5. O que mostra que, devido ao modelo ter sido gerado considerando uma situação conservadora de parâmetros para solos saturados, ele gera resultados a favor da segurança em situações menos críticas como as não saturadas.

Além disso, tendo como base uma “simulação controle”, com os parâmetros com os valores médios utilizados no estudo, variou-se cada parâmetro para fora dos limites do espectro de valores utilizados neste trabalho. Os resultados encontram-se na Tabela 15 abaixo.

Tabela 15-Resultados da validação para valores fora da faixa calculada

Parâmetro variado	Simulação	H (m)	C' (KPa)	Fi' (°)	Gama (KN/m <sup>3</sup> )	FS saturado	FS não saturado
Peso específico	controle	12	20	32	18	1,56	2,83
	34	12	20	32	13	1,82	3,52
	35	12	20	32	11	1,98	3,93
	36	12	20	32	23	1,41	2,41
	37	12	20	32	25	1,36	2,31
Ângulo de atrito	38	12	20	16	18	1,29	1,87
	39	12	20	18	18	1,34	2,01
	40	12	20	47	18	1,52	3,56
	41	12	20	49	18	1,49	3,54
Coesão	42	12	1	32	18	1,5	3,14
	43	12	37	32	18	1,65	2,72
	44	12	42	32	18	1,55	2,64
	45	12	47	32	18	1,53	2,53
	46	12	52	32	18	1,48	2,4
Altura	47	4	20	32	18	1,61	3,75
	48	23	20	32	18	1,31	2,23

Tabela 15-Resultados da validação para valores fora da faixa calculada

Parâmetro variado	Simulação	H (m)	C' (kPa)	Fi' (°)	Gama (kN/m³)	FS saturado	FS não saturado
	49	28	20	32	18	1,26	2,11
	50	38	20	32	18	1,19	1,96
	51	48	20	32	18	1,14	1,86
	52	68	20	32	18	1,07	1,75

Fonte: Autoral.

Na análise de parâmetros de solos saturados, 9 das 20 simulações apresentaram valores do FS iguais ou superiores a 1,5; 12 acima de 1,4; 15 acima de 1,3 e 17 acima de 1,2; representando 45%, 60%, 75% e 85%, respectivamente, dos resultados sendo satisfatórios, segundo a NBR 9061/1985 – Segurança de escavação a céu aberto.

Assim, o peso específico possuiu resultados acima de 1,5 para valores inferiores e resultados menores, mas ainda dentro da faixa estipulada por norma, para valores superiores, o que corrobora com a análise de variação feita, mostrando que, de fato, o modelo tende a gerar ângulos maiores à medida que se aumenta o peso específico. Situação ocasionada pela não relevância do parâmetro na equação.

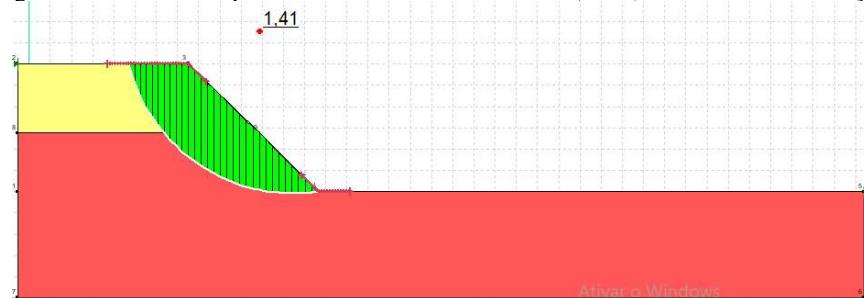
Já para o ângulo de atrito, apenas para o valor de 47° o FS foi acima de 1,5, mas ainda apresentando valores superiores a 1,2 nos demais. Quanto a coesão, esta apresentou resultados acima de 1,5 tanto para o valor de 1 kPa quanto para valores próximos a 50 kPa. Por fim, a altura só apresentou um FS acima de 1,5 para o valor de 4 metros, não sendo possível avaliar valores mais baixos por limitações do software e apresentou valores satisfatórios até próximo à 38 metros.

Já na análise de parâmetros de solos não saturados, assim como na etapa anterior, 100% das simulações apresentaram FS superiores a 1,5. Com um destaque para o fato de que mesmo para uma altura de 68 metros, o FS, que na condição saturada era de apenas 1,07, foi de 1,75. Demonstrando que as variações notadas no tópico anterior realmente ocorrem, mas ao aplicarmos os parâmetros não saturados, o FS ainda se mantém alto.

#### 4.2.2. Maciço de Lehmkuhl e Abreu (2021).

No caso 1, utilizando os solos, em amarelo “Silte argilo arenoso” e em vermelho “Argila arenosa média”, como ilustrado na Figura 12, chegou-se aos seguintes resultados mostrados na Tabela 16.

Figura 12- Talude Simplificado de Lehmkuhl e Abreu (2021) no caso 1 da validação



Fonte: Autoral.

Tabela 16-Resultados da validação do caso 1 do talude de Lehmkuhl e Abreu (2021).

Camada	H (m)	C' (kPa)	Fi' (°)	Gama (kN/m <sup>3</sup> )	FS saturado	FS não saturado
superior	6,5	0	35,8	17		
inferior	6,5	50	7,33	17		
Camada única	12	25	21,57	17	1,47	2,15

Fonte: Autoral.

Nesse caso, com os parâmetros saturados, apesar do FS ser inferior a 1,5, ainda foi acima de 1,4, considerado satisfatório para riscos médios e baixos. Entretanto, ao aplicar os valores de parâmetros não saturados o FS se mostrou muito superior ao mínimo necessário. Entretanto, vale pontuar que o valor médio do ângulo de atrito se aproximou muito do limite inferior dos dados utilizados e, como já foi mostrado anteriormente, essa é uma zona de valores que tende a gerar ângulos maiores, ocasionando menores FS.

No caso 2, utilizando os solos, em amarelo “Silte argilo arenoso” e em vermelho “Argila mole”, como ilustrado na Figura 13, chegou-se aos seguintes resultados mostrados na Tabela 17.

Figura 13-Talude Simplificado de Lehmkuhl e Abreu (2021) no caso 2 da validação



Fonte: Autoral.

Tabela 17-Dados da validação do caso 2 do talude de Lehmkuhl e Abreu (2021).

Camada	H (m)	C' (kPa)	Fi' (°)	Gama (kN/m <sup>3</sup> )	FS saturado	FS não saturado
superior	6,5	0	35,8	17		
inferior	6,5	25	30	15		
Camada única	12	12,5	32,9	16	1,73	3,11

Fonte: Autoral.

Desta vez, diferentemente do caso 1, o ângulo de atrito médio estava em uma faixa considerada “boa”, mas a coesão, por sua vez, apresenta-se próxima ao limite inferior, o que poderia gerar FS baixos. Entretanto, o FS foi bem satisfatório em ambos os casos.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A seguir, serão apresentadas as conclusões obtidas durante a realização da pesquisa e algumas proposições de pesquisas futuras.

### 5.1. Conclusões

O presente estudo tinha como objetivo principal propor um modelo matemático para estimar o ângulo de inclinação de taludes, utilizando como base os dados obtidos no processo de análise de estabilidade, com o intuito de contribuir para o processo de dimensionamento de taludes. Para isso, realizou-se simulações no software Geostudio e, a partir dos dados obtidos, foi aplicado um método estatístico para tratamento de erros e modelagem da equação. No qual, se baseava em supor incógnitas para os parâmetros utilizados e, em um processo interativo, reduzir o erro médio total entre o dado simulado e o resultado da equação ao variar essas incógnitas.

O modelo gerado apresentou um  $R^2$  de 0,87, que se mostrou efetivamente satisfatório em alguns casos. No entanto, o modelo mostrou-se falho em várias situações, em especial, em alturas abaixo de 10 metros e acima de 14, e em baixos valores de coesão e ângulo de atrito, onde a probabilidade de erro é superior a 10%. Assim como, o fato de que, em caso de erro, nessas faixas citadas, a chance de o erro provocar um FS abaixo de 1,5 é maior do que a de gerar um acima de 1,5.

Entretanto, na validação, foi possível notar que, mesmo nos casos de FS inferior a 1,5, este, geralmente, possui valor acima de 1,2, que é o permitido por norma para situações de menor proteção. Além disso, quando avaliado com os valores de parâmetros não saturados, o modelo apresentou resultados de FS aceitáveis na totalidade dos casos.

Com isso, duas possibilidades de ação podem ser tomadas:

A primeira seria a retirada da condição de utilização do modelo para alturas inferiores a 10 metros, coesões inferiores a 12 KPa e ângulos de atrito inferior a 25°. Com o intuito de tornar o modelo aceitável mesmo para os casos mais críticos.

A segunda seria, considerando que, para situações mais próximas da realidade, o modelo apresentou bons resultados em uma ampla faixa de valores. Assim aceitando-o como uma versão otimizada de dimensionamento, e buscar aprimorá-lo para as condições não utilizadas neste estudo.

Entretanto, em ambos os casos, o peso específico precisa ser desconsiderado e retirado da equação.

Ademais, as maiores limitações encontradas neste estudo foram em razão de não

terem sido testadas outras as possibilidades de tratamento estatístico e das simulações feitas terem tido como base o FS de 1,5, diminuído a margem de erro aceitável, o que torna possível afirmar que devem existir outras versões mais adequadas para o modelo.

Finalmente, o trabalho atendeu aos objetivos propostos no capítulo inicial de forma integral e satisfatória.

### **5.2. Sugestões para trabalhos futuros**

De acordo com os resultados obtidos e com base no conhecimento adquirido ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, percebeu-se que existe a necessidade de outros trabalhos que venham a complementar este estudo. Assim, recomenda-se a realização das seguintes pesquisas:

- a) Aprimoramento do modelo, a partir do aumento do número de variáveis e da faixa de valores utilizada em cada parâmetro;
- b) Aperfeiçoar a equação aplicando simulações com um FS superior a 1,5, a fim de se ter uma maior folga para erros.
- c) Aperfeiçoar a análise utilizando mais de um tipo de solo;
- d) Avaliar a influência da percolação no maciço; e
- e) Aperfeiçoar a análise utilizando outras geometrias de taludes.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. A; OLIVEIRA, R. M. M. **Estimativa do Ângulo de Atrito e Coesão Através de Índices de Resistência Obtidos pela Sondagem SPT em Solo Laterítico e Colapsível Característico da Cidade de Cascavel no Estado do Paraná.** In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano, 19., 2018, Salvador. Anais eletrônicos... Salvador: ABMS, 2018. Disponível em: <https://philos.sophia.com.br/terminal/8530/acervo/detalhe/4174?guid=1633284698077&returUrl=%2fterminal%2f8530%2fresultado%2flistar%3fguid%3d1633284698077%26quantidadePginas%3d1%26codigoRegistro%3d4174%234174&i=1>. Acesso em: 3 out. 2021.
- AYALA, GROVER ROMER LLANQUE. **Verificação Da Estabilidade Do Talude De Montante Em Barragem De Terra Submetida A Rebaixamento Rápido Realizada Com Ensaios Em Solos Não Saturados E Modelagem Numérica.** 2018. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de PósGraduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- BIANCHINI, M. REGINA. **Estudo Da Instabilidade De Um Talude Rodoviário Em São Jerônimo/Rs.** Dissertação do Programa de Pós Graduação em Engenharia civil da Escola da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.
- CALLE, J.A.C. **Analise de Ruptura de Talude em Solo Não Saturado.** 2000, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Paulo, SP, 177p.
- FERREIRA, S.; PISTONE, R. S.; RIBEIRO, J. (2012). **A importância dos ensaios de pregagens. Resultados obtidos em casos de obra.** XIII Congresso Nacional de Geotecnia, 20 p., LNEC, Lisboa.
- FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: Aplicação na estabilidade dos taludes.** Curitiba: Editora da UFPR, 2009.
- GERSCOVICH, DENISE. **Estabilidade De Taludes.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012
- GUIDICINI, G., NIEBLE, C. M. (1984). **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação.** Edgard Blücher/Edusp, São Paulo, 1984. 170p.
- GUIDICINI, GUIDO, NIEBLE, CARLOS MANUEL. **Estabilidade de taludes.** São Paulo, 2º edições: Oficina de Textos, 2016.
- HORST, R. **Avaliação dos métodos para cálculo de estabilidade em maciço terroso.** 2007. 129 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – UNIJUÍ, Ijuí, 2007.
- HRADILEK, P. (2002). **Avaliação de pequenas barragens.** Brasília: Bureau of Reclamation, United States Department of Interior, 74 p. il. [Manual de Irrigação, v.6].
- KRAHN, JOHN. **Stability modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology:** First Edition, Revision, v. 1, n. 396, p. 70, 2004.

LEHMKUHL, ELIZABETH; ABREU, STHEFANY DOS SANTOS. **Análise de estabilidade de talude: estudo de caso: talude da NSCTV**–comunicação (Florianópolis/SC). 2021.

LEITE, BRENO VINÍCIUS COSTA; LINS, MAYARA RODRIGUES. **A viabilidade de obras de contenção e estabilização de taludes em Maceió-AL**. 2017. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário CESMAC, Maceió-AL, 2017.

LEME, ROSIEL FERREIRA. **Influência da sucção mátrica nas condições de fluxo e estabilidade de taludes da Barragem Pesqueiro**. 2009.

LEME, R. F.; CAVALCANTE, S. P. P. **Implementação do Método de Análise de Risco Para a Otimização da Seção Transversal de Uma Barragem de Terra**. 2006.

LEVINE, DAVID. M.; STEPHAN, DAVID F.; SZABAT, KATHRYN A.. **Estatística: Teoria e Aplicações usando o Microsoft® Excel em Português**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. Tradução e revisão técnica de: Teresa Cristina Padilha de Souza.

MATTOS, THALITA DO BEM. **Modelos Não Lineares e suas Aplicações**. 2013. 58 f. Monografia (Graduação) - Curso de Estatística, Instituto de Ciências Exatas: Departamento de Estatística, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2013.

MORETTIN, PEDRO A.; BUSSAB, WILTON DE O.. **Estatística Básica**. 8. ed. São Paulo: Saraiva, 2013.

PEREIRA, TONISMAR DOS SANTOS. **Avaliação Do Desempenho De Diferentes Métodos De Análise De Estabilidade De Taludes Em Barragens De Terra**. 2013. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Santa Maria, [S. l.], 2013.

SILVA, SUYANNE COSTA. **Estudo da Permeabilidade de Solos Granulares Utilizando Redes Neurais Artificiais**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – UFC, Fortaleza, 2020.

TERZAGHI, K. **Theoretical Soil Mechanics**. J. Wiley and sons, New York, 1943.

THOMAZ, JOSÉ EDUARDO S. **Rotina de geração randômica de superfícies críticas na análise da estabilidade de taludes**. PUC/RJ, Rio de Janeiro, 1984.

TRIOLA, MÁRIO F.. **Introdução à Estatística: Atualização da Tecnologia**. 11. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. Tradução e revisão técnica de: Ana Maria Lima de Farias, D.Sc. e Vera Regina Lima de Farias e Flores, M.Sc..

VANMARCKE, E. **Risk of Limit-Equilibrium Failure of Long Earth Slopes: How it depends on Length**. Geo Risk, ASCE, 2011. Disponível em <<https://ascelibrary.org>> Acesso em: 17 Jul. 2021.

## APÊNDICE A – PLANILHA DOS DADOS COLETADOS

SIMULAÇÃO	H (m)	C (kPa)	fi (º)	Gama (kN/m³)	Pontos				delta X	delta y	alfa (º)			
					1		2							
					x	y	x	y						
1	6	2	20	15	15	16	33,1	10	18,1	6	18,3			
2	6	7	20	15	15	16	25,6	10	10,6	6	29,5			
3	6	12	20	15	15	16	21,1	10	6,1	6	44,5			
4	6	17	20	15	15	16	17,7	10	2,7	6	65,8			
5	6	22	20	15	15	16	16,3	10	1,3	6	77,8			
6	6	2	25	15	15	16	29	10	14	6	23,2			
7	6	7	25	15	15	16	23,2	10	8,2	6	36,2			
8	6	12	25	15	15	16	19,8	10	4,8	6	51,3			
9	6	17	25	15	15	16	17,3	10	2,3	6	69,0			
10	6	2	30	15	15	16	26,3	10	11,3	6	28,0			
11	6	7	30	15	15	16	21,6	10	6,6	6	42,3			
12	6	12	30	15	15	16	18,8	10	3,8	6	57,7			
13	6	17	30	15	15	16	16,7	10	1,7	6	74,2			
14	6	2	35	15	15	16	24,3	10	9,3	6	32,8			
15	6	7	35	15	15	16	20,3	10	5,3	6	48,5			
16	6	12	35	15	15	16	17,4	10	2,4	6	68,2			
17	6	17	35	15	15	16	16,1	10	1,1	6	79,6			
18	6	2	40	15	15	16	22,7	10	7,7	6	37,9			
19	6	7	40	15	15	16	19,3	10	4,3	6	54,4			
20	6	12	40	15	15	16	17	10	2	6	71,6			
21	6	17	40	15	15	16	15,7	10	0,7	6	83,3			
22	6	2	45	15	15	16	21,3	10	6,3	6	43,6			
23	6	7	45	15	15	16	18,5	10	3,5	6	59,7			
24	6	12	45	15	15	16	16,6	10	1,6	6	75,1			
25	6	17	45	15	15	16	15,3	10	0,3	6	87,1			
26	6	2	20	17	15	16	33,6	10	18,6	6	17,9			
27	6	7	20	17	15	16	26,7	10	11,7	6	27,1			
28	6	12	20	17	15	16	22,3	10	7,3	6	39,4			
29	6	17	20	17	15	16	19,3	10	4,3	6	54,4			
30	6	22	20	17	15	16	17,1	10	2,1	6	70,7			
31	6	27	20	17	15	16	15,9	10	0,9	6	81,5			
32	6	2	25	17	15	16	29,4	10	14,4	6	22,6			
33	6	7	25	17	15	16	24,1	10	9,1	6	33,4			
34	6	12	25	17	15	16	20,7	10	5,7	6	46,5			
35	6	17	25	17	15	16	17,7	10	2,7	6	65,8			
36	6	22	25	17	15	16	16,4	10	1,4	6	76,9			
37	6	27	25	17	15	16	15,4	10	0,4	6	86,2			
38	6	2	30	17	15	16	26,6	10	11,6	6	27,3			
39	6	7	30	17	15	16	22,3	10	7,3	6	39,4			
40	6	12	30	17	15	16	19,5	10	4,5	6	53,1			
41	6	17	30	17	15	16	17,4	10	2,4	6	68,2			
42	6	22	30	17	15	16	16	10	1	6	80,5			

SIMULAÇÃO	H (m)	C (kPa)	fi (º)	Gama (kN/m³)	Pontos				delta X	delta y	alfa (º)			
					1		2							
					x	y	x	y						
43	6	2	35	17	15	16	24,5	10	9,5	6	32,3			
44	6	7	35	17	15	16	20,9	10	5,9	6	45,5			
45	6	12	35	17	15	16	18,6	10	3,6	6	59,0			
46	6	17	35	17	15	16	16,9	10	1,9	6	72,4			
47	6	22	35	17	15	16	15,5	10	0,5	6	85,2			
48	6	2	40	17	15	16	22,9	10	7,9	6	37,2			
49	6	7	40	17	15	16	19,7	10	4,7	6	51,9			
50	6	12	40	17	15	16	17,7	10	2,7	6	65,8			
51	6	17	40	17	15	16	16,2	10	1,2	6	78,7			
52	6	2	45	17	15	16	21,6	10	6,6	6	42,3			
53	6	7	45	17	15	16	18,9	10	3,9	6	57,0			
54	6	12	45	17	15	16	17	10	2	6	71,6			
55	6	17	45	17	15	16	15,8	10	0,8	6	82,4			
56	6	2	20	19	15	16	34,1	10	19,1	6	17,4			
57	6	7	20	19	15	16	27,5	10	12,5	6	25,6			
58	6	12	20	19	15	16	23,2	10	8,2	6	36,2			
59	6	17	20	19	15	16	20,3	10	5,3	6	48,5			
60	6	22	20	19	15	16	17,7	10	2,7	6	65,8			
61	6	27	20	19	15	16	16,6	10	1,6	6	75,1			
62	6	32	20	19	15	16	15,5	10	0,5	6	85,2			
63	6	2	25	19	15	16	29,9	10	14,9	6	21,9			
64	6	7	25	19	15	16	24,7	10	9,7	6	31,7			
65	6	12	25	19	15	16	21,4	10	6,4	6	43,2			
66	6	17	25	19	15	16	19,1	10	4,1	6	55,7			
67	6	22	25	19	15	16	17,2	10	2,2	6	69,9			
68	6	27	25	19	15	16	16,1	10	1,1	6	79,6			
69	6	32	25	19	15	16	15,1	10	0,1	6	89,0			
70	6	2	30	19	15	16	27	10	12	6	26,6			
71	6	7	30	19	15	16	22,8	10	7,8	6	37,6			
72	6	12	30	19	15	16	20	10	5	6	50,2			
73	6	17	30	19	15	16	17,6	10	2,6	6	66,6			
74	6	22	30	19	15	16	16,7	10	1,7	6	74,2			
75	6	27	30	19	15	16	15,6	10	0,6	6	84,3			
76	6	2	35	19	15	16	24,8	10	9,8	6	31,5			
77	6	7	35	19	15	16	21,4	10	6,4	6	43,2			
78	6	12	35	19	15	16	19,1	10	4,1	6	55,7			
79	6	17	35	19	15	16	17,2	10	2,2	6	69,9			
80	6	22	35	19	15	16	16,2	10	1,2	6	78,7			
81	6	27	35	19	15	16	15,2	10	0,2	6	88,1			
82	6	2	40	19	15	16	23,2	10	8,2	6	36,2			
83	6	7	40	19	15	16	20,2	10	5,2	6	49,1			
84	6	12	40	19	15	16	18,3	10	3,3	6	61,2			
85	6	17	40	19	15	16	16,6	10	1,6	6	75,1			

SIMULAÇÃO	H (m)	C (kPa)	fi (º)	Gama (kN/m³)	Pontos				delta X	delta y	alfa (º)			
					1		2							
					x	y	x	y						
86	6	22	40	19	15	16	15,7	10	0,7	6	83,3			
87	6	2	45	19	15	16	21,8	10	6,8	6	41,4			
88	6	7	45	19	15	16	19,3	10	4,3	6	54,4			
89	6	12	45	19	15	16	17,6	10	2,6	6	66,6			
90	6	17	45	19	15	16	16,2	10	1,2	6	78,7			
91	6	22	45	19	15	16	15,2	10	0,2	6	88,1			
92	6	2	20	21	15	16	34,5	10	19,5	6	17,1			
93	6	7	20	21	15	16	28,1	10	13,1	6	24,6			
94	6	12	20	21	15	16	24	10	9	6	33,7			
95	6	17	20	21	15	16	21	10	6	6	45,0			
96	6	22	20	21	15	16	18,8	10	3,8	6	57,7			
97	6	27	20	21	15	16	17,2	10	2,2	6	69,9			
98	6	32	20	21	15	16	16	10	1	6	80,5			
99	6	2	25	21	15	16	30,2	10	15,2	6	21,5			
100	6	7	25	21	15	16	25,2	10	10,2	6	30,5			
101	6	12	25	21	15	16	22	10	7	6	40,6			
102	6	17	25	21	15	16	19,7	10	4,7	6	51,9			
103	6	22	25	21	15	16	17,6	10	2,6	6	66,6			
104	6	27	25	21	15	16	16,5	10	1,5	6	76,0			
105	6	32	25	21	15	16	15,6	10	0,6	6	84,3			
106	6	2	30	21	15	16	27,2	10	12,2	6	26,2			
107	6	7	30	21	15	16	23,3	10	8,3	6	35,9			
108	6	12	30	21	15	16	20,6	10	5,6	6	47,0			
109	6	17	30	21	15	16	18,7	10	3,7	6	58,3			
110	6	22	30	21	15	16	17,1	10	2,1	6	70,7			
111	6	27	30	21	15	16	15,9	10	0,9	6	81,5			
112	6	32	30	21	15	16	15,1	10	0,1	6	89,0			
113	6	2	35	21	15	16	25,1	10	10,1	6	30,7			
114	6	7	35	21	15	16	21,7	10	6,7	6	41,8			
115	6	12	35	21	15	16	19,5	10	4,5	6	53,1			
116	6	17	35	21	15	16	17,4	10	2,4	6	68,2			
117	6	22	35	21	15	16	16,5	10	1,5	6	76,0			
118	6	27	35	21	15	16	15,6	10	0,6	6	84,3			
119	6	2	40	21	15	16	23,4	10	8,4	6	35,5			
120	6	7	40	21	15	16	20,5	10	5,5	6	47,5			
121	6	12	40	21	15	16	18,7	10	3,7	6	58,3			
122	6	17	40	21	15	16	17	10	2	6	71,6			
123	6	22	40	21	15	16	16,1	10	1,1	6	79,6			
124	6	27	40	21	15	16	15,2	10	0,2	6	88,1			
125	6	2	45	21	15	16	21,9	10	6,9	6	41,0			
126	6	7	45	21	15	16	19,4	10	4,4	6	53,7			
127	6	12	45	21	15	16	17,8	10	2,8	6	65,0			
128	6	17	45	21	15	16	16,5	10	1,5	6	76,0			

SIMULAÇÃO	H (m)	C (kPa)	fi (º)	Gama (kN/m³)	Pontos				delta X	delta y	alfa (º)			
					1		2							
					x	y	x	y						
129	6	22	45	21	15	16	15,6	10	0,6	6	84,3			
130	10	2	20	15	15	20	48,3	10	33,3	10	16,7			
131	10	7	20	15	15	20	39	10	24	10	22,6			
132	10	12	20	15	15	20	32,5	10	17,5	10	29,7			
133	10	17	20	15	15	20	27,5	10	12,5	10	38,7			
134	10	22	20	15	15	20	23,9	10	8,9	10	48,3			
135	10	27	20	15	15	20	20,5	10	5,5	10	61,2			
136	10	32	20	15	15	20	18,8	10	3,8	10	69,2			
137	10	2	25	15	15	20	40,9	10	25,9	10	21,1			
138	10	7	25	15	15	20	33,5	10	18,5	10	28,4			
139	10	12	25	15	15	20	28,4	10	13,4	10	36,7			
140	10	17	25	15	15	20	24,8	10	9,8	10	45,6			
141	10	22	25	15	15	20	21,9	10	6,9	10	55,4			
142	10	27	25	15	15	20	19	10	4	10	68,2			
143	10	32	25	15	15	20	17,8	10	2,8	10	74,4			
144	10	2	30	15	15	20	35,9	10	20,9	10	25,6			
145	10	7	30	15	15	20	29,7	10	14,7	10	34,2			
146	10	12	30	15	15	20	25,8	10	10,8	10	42,8			
147	10	17	30	15	15	20	22,7	10	7,7	10	52,4			
148	10	22	30	15	15	20	19,9	10	4,9	10	63,9			
149	10	27	30	15	15	20	18,4	10	3,4	10	71,2			
150	10	32	30	15	15	20	16,9	10	1,9	10	79,2			
151	10	2	35	15	15	20	32,1	10	17,1	10	30,3			
152	10	7	35	15	15	20	27,2	10	12,2	10	39,3			
153	10	12	35	15	15	20	23,8	10	8,8	10	48,7			
154	10	17	35	15	15	20	21,2	10	6,2	10	58,2			
155	10	22	35	15	15	20	18,8	10	3,8	10	69,2			
156	10	27	35	15	15	20	17,4	10	2,4	10	76,5			
157	10	32	35	15	15	20	16,1	10	1,1	10	83,7			
158	10	2	40	15	15	20	29,2	10	14,2	10	35,2			
159	10	7	40	15	15	20	24,9	10	9,9	10	45,3			
160	10	12	40	15	15	20	22	10	7	10	55,0			
161	10	17	40	15	15	20	20	10	5	10	63,4			
162	10	22	40	15	15	20	18	10	3	10	73,3			
163	10	27	40	15	15	20	16,6	10	1,6	10	80,9			
164	10	32	40	15	15	20	15,4	10	0,4	10	87,7			
165	10	2	45	15	15	20	26,8	10	11,8	10	40,3			
166	10	7	45	15	15	20	23,3	10	8,3	10	50,3			
167	10	12	45	15	15	20	20,7	10	5,7	10	60,3			
168	10	17	45	15	15	20	18,6	10	3,6	10	70,2			
169	10	22	45	15	15	20	17,1	10	2,1	10	78,1			
170	10	27	45	15	15	20	15,8	10	0,8	10	85,4			
171	10	2	20	17	15	20	48,9	10	33,9	10	16,4			

SIMULAÇÃO	H (m)	C (kPa)	fi (º)	Gama (kN/m³)	Pontos				delta X	delta y	alfa (º)			
					1		2							
					x	y	x	y						
172	10	7	20	17	15	20	40,4	10	25,4	10	21,5			
173	10	12	20	17	15	20	33,8	10	18,8	10	28,0			
174	10	17	20	17	15	20	29,3	10	14,3	10	35,0			
175	10	22	20	17	15	20	25,6	10	10,6	10	43,3			
176	10	27	20	17	15	20	22,8	10	7,8	10	52,0			
177	10	32	20	17	15	20	20,3	10	5,3	10	62,1			
178	10	2	25	17	15	20	41,4	10	26,4	10	20,7			
179	10	7	25	17	15	20	34,8	10	19,8	10	26,8			
180	10	12	25	17	15	20	29,7	10	14,7	10	34,2			
181	10	17	25	17	15	20	26,2	10	11,2	10	41,8			
182	10	22	25	17	15	20	23,4	10	8,4	10	50,0			
183	10	27	25	17	15	20	20,9	10	5,9	10	59,5			
184	10	32	25	17	15	20	19	10	4	10	68,2			
185	10	2	30	17	15	20	36,2	10	21,2	10	25,3			
186	10	7	30	17	15	20	30,7	10	15,7	10	32,5			
187	10	12	30	17	15	20	26,8	10	11,8	10	40,3			
188	10	17	30	17	15	20	23,9	10	8,9	10	48,3			
189	10	22	30	17	15	20	21,5	10	6,5	10	57,0			
190	10	27	30	17	15	20	19,3	10	4,3	10	66,7			
191	10	32	30	17	15	20	17,9	10	2,9	10	73,8			
192	10	2	35	17	15	20	32,5	10	17,5	10	29,7			
193	10	7	35	17	15	20	27,8	10	12,8	10	38,0			
194	10	12	35	17	15	20	24,5	10	9,5	10	46,5			
195	10	17	35	17	15	20	22,1	10	7,1	10	54,6			
196	10	22	35	17	15	20	20,2	10	5,2	10	62,5			
197	10	27	35	17	15	20	18,4	10	3,4	10	71,2			
198	10	32	35	17	15	20	17	10	2	10	78,7			
199	10	2	40	17	15	20	29,5	10	14,5	10	34,6			
200	10	7	40	17	15	20	25,5	10	10,5	10	43,6			
201	10	12	40	17	15	20	22,8	10	7,8	10	52,0			
202	10	17	40	17	15	20	20,7	10	5,7	10	60,3			
203	10	22	40	17	15	20	18,7	10	3,7	10	69,7			
204	10	27	40	17	15	20	17,6	10	2,6	10	75,4			
205	10	32	40	17	15	20	16,3	10	1,3	10	82,6			
206	10	2	45	17	15	20	27,1	10	12,1	10	39,6			
207	10	7	45	17	15	20	23,7	10	8,7	10	49,0			
208	10	12	45	17	15	20	21,3	10	6,3	10	57,8			
209	10	17	45	17	15	20	19,6	10	4,6	10	65,3			
210	10	22	45	17	15	20	17,8	10	2,8	10	74,4			
211	10	27	45	17	15	20	16,6	10	1,6	10	80,9			
212	10	32	45	17	15	20	15,5	10	0,5	10	87,1			
213	10	2	20	19	15	20	49,3	10	34,3	10	16,3			
214	10	7	20	19	15	20	41,4	10	26,4	10	20,7			

SIMULAÇÃO	H (m)	C (kPa)	fi (º)	Gama (kN/m³)	Pontos				delta X	delta y	alfa (º)			
					1		2							
					x	y	x	y						
215	10	12	20	19	15	20	35,4	10	20,4	10	26,1			
216	10	17	20	19	15	20	30,8	10	15,8	10	32,3			
217	10	22	20	19	15	20	27,2	10	12,2	10	39,3			
218	10	27	20	19	15	20	24,4	10	9,4	10	46,8			
219	10	32	20	19	15	20	21,8	10	6,8	10	55,8			
220	10	2	25	19	15	20	41,7	10	26,7	10	20,5			
221	10	7	25	19	15	20	35,2	10	20,2	10	26,3			
222	10	12	25	19	15	20	30,8	10	15,8	10	32,3			
223	10	17	25	19	15	20	27,3	10	12,3	10	39,1			
224	10	22	25	19	15	20	24,5	10	9,5	10	46,5			
225	10	27	25	19	15	20	22,3	10	7,3	10	53,9			
226	10	32	25	19	15	20	20	10	5	10	63,4			
227	10	2	30	19	15	20	36,6	10	21,6	10	24,8			
228	10	7	30	19	15	20	31,2	10	16,2	10	31,7			
229	10	12	30	19	15	20	27,6	10	12,6	10	38,4			
230	10	17	30	19	15	20	24,9	10	9,9	10	45,3			
231	10	22	30	19	15	20	22,5	10	7,5	10	53,1			
232	10	27	30	19	15	20	20,7	10	5,7	10	60,3			
233	10	32	30	19	15	20	18,9	10	3,9	10	68,7			
234	10	2	35	19	15	20	32,8	10	17,8	10	29,3			
235	10	7	35	19	15	20	28,3	10	13,3	10	36,9			
236	10	12	35	19	15	20	25,4	10	10,4	10	43,9			
237	10	17	35	19	15	20	23	10	8	10	51,3			
238	10	22	35	19	15	20	21,1	10	6,1	10	58,6			
239	10	27	35	19	15	20	18,8	10	3,8	10	69,2			
240	10	32	35	19	15	20	17,8	10	2,8	10	74,4			
241	10	2	40	19	15	20	29,7	10	14,7	10	34,2			
242	10	7	40	19	15	20	25,9	10	10,9	10	42,5			
243	10	12	40	19	15	20	23,4	10	8,4	10	50,0			
244	10	17	40	19	15	20	21,4	10	6,4	10	57,4			
245	10	22	40	19	15	20	19,7	10	4,7	10	64,8			
246	10	27	40	19	15	20	18,2	10	3,2	10	72,3			
247	10	32	40	19	15	20	16,9	10	1,9	10	79,2			
248	10	2	45	19	15	20	27,3	10	12,3	10	39,1			
249	10	7	45	19	15	20	24	10	9	10	48,0			
250	10	12	45	19	15	20	21,9	10	6,9	10	55,4			
251	10	17	45	19	15	20	20,1	10	5,1	10	63,0			
252	10	22	45	19	15	20	18,4	10	3,4	10	71,2			
253	10	27	45	19	15	20	17,4	10	2,4	10	76,5			
254	10	32	45	19	15	20	16,2	10	1,2	10	83,2			
255	10	2	20	21	15	20	49,7	10	34,7	10	16,1			
256	10	7	20	21	15	20	42,1	10	27,1	10	20,3			
257	10	12	20	21	15	20	36,4	10	21,4	10	25,0			

SIMULAÇÃO	H (m)	C (kPa)	fi (º)	Gama (kN/m³)	Pontos				delta X	delta y	alfa (º)			
					1		2							
					x	y	x	y						
258	10	17	20	21	15	20	32,2	10	17,2	10	30,2			
259	10	22	20	21	15	20	28,6	10	13,6	10	36,3			
260	10	27	20	21	15	20	25,8	10	10,8	10	42,8			
261	10	32	20	21	15	20	23,4	10	8,4	10	50,0			
262	10	2	25	21	15	20	42	10	27	10	20,3			
263	10	7	25	21	15	20	36	10	21	10	25,5			
264	10	12	25	21	15	20	31,8	10	16,8	10	30,8			
265	10	17	25	21	15	20	28,3	10	13,3	10	36,9			
266	10	22	25	21	15	20	25,6	10	10,6	10	43,3			
267	10	27	25	21	15	20	23,4	10	8,4	10	50,0			
268	10	32	25	21	15	20	20,7	10	5,7	10	60,3			
269	10	2	30	21	15	20	36,8	10	21,8	10	24,6			
270	10	7	30	21	15	20	32	10	17	10	30,5			
271	10	12	30	21	15	20	28,4	10	13,4	10	36,7			
272	10	17	30	21	15	20	25,6	10	10,6	10	43,3			
273	10	22	30	21	15	20	23,4	10	8,4	10	50,0			
274	10	27	30	21	15	20	21,6	10	6,6	10	56,6			
275	10	32	30	21	15	20	19,3	10	4,3	10	66,7			
276	10	2	35	21	15	20	32,9	10	17,9	10	29,2			
277	10	7	35	21	15	20	28,9	10	13,9	10	35,7			
278	10	12	35	21	15	20	26	10	11	10	42,3			
279	10	17	35	21	15	20	23,6	10	8,6	10	49,3			
280	10	22	35	21	15	20	21,9	10	6,9	10	55,4			
281	10	27	35	21	15	20	20,2	10	5,2	10	62,5			
282	10	32	35	21	15	20	18,7	10	3,7	10	69,7			
283	10	2	40	21	15	20	29,9	10	14,9	10	33,9			
284	10	7	40	21	15	20	26,4	10	11,4	10	41,3			
285	10	12	40	21	15	20	24	10	9	10	48,0			
286	10	17	40	21	15	20	22,1	10	7,1	10	54,6			
287	10	22	40	21	15	20	20,4	10	5,4	10	61,6			
288	10	27	40	21	15	20	18,6	10	3,6	10	70,2			
289	10	32	40	21	15	20	17,8	10	2,8	10	74,4			
290	10	2	45	21	15	20	27,4	10	12,4	10	38,9			
291	10	7	45	21	15	20	24,4	10	9,4	10	46,8			
292	10	12	45	21	15	20	22,3	10	7,3	10	53,9			
293	10	17	45	21	15	20	20,6	10	5,6	10	60,8			
294	10	22	45	21	15	20	19,2	10	4,2	10	67,2			
295	10	27	45	21	15	20	18	10	3	10	73,3			
296	10	32	45	21	15	20	16,8	10	1,8	10	79,8			
297	14	2	20	15	15	24	63,4	10	48,4	14	16,1			
298	14	7	20	15	15	24	53	10	38	14	20,2			
299	14	12	20	15	15	24	45	10	30	14	25,0			
300	14	17	20	15	15	24	39	10	24	14	30,3			

SIMULAÇÃO	H (m)	C (kPa)	fi (º)	Gama (kN/m³)	Pontos				delta X	delta y	alfa (º)			
					1		2							
					x	y	x	y						
301	14	22	20	15	15	24	34	10	19	14	36,4			
302	14	27	20	15	15	24	29,8	10	14,8	14	43,4			
303	14	32	20	15	15	24	25,4	10	10,4	14	53,4			
304	14	2	25	15	15	24	51,6	10	36,6	14	20,9			
305	14	7	25	15	15	24	43	10	28	14	26,6			
306	14	12	25	15	15	24	37	10	22	14	32,5			
307	14	17	25	15	15	24	32,4	10	17,4	14	38,8			
308	14	22	25	15	15	24	28,6	10	13,6	14	45,8			
309	14	27	25	15	15	24	25,4	10	10,4	14	53,4			
310	14	32	25	15	15	24	22,6	10	7,6	14	61,5			
311	14	2	30	15	15	24	45,6	10	30,6	14	24,6			
312	14	7	30	15	15	24	38,6	10	23,6	14	30,7			
313	14	12	30	15	15	24	33,8	10	18,8	14	36,7			
314	14	17	30	15	15	24	30	10	15	14	43,0			
315	14	22	30	15	15	24	26,8	10	11,8	14	49,9			
316	14	27	30	15	15	24	24,2	10	9,2	14	56,7			
317	14	32	30	15	15	24	20,8	10	5,8	14	67,5			
318	14	2	35	15	15	24	40,2	10	25,2	14	29,1			
319	14	7	35	15	15	24	34,2	10	19,2	14	36,1			
320	14	12	35	15	15	24	30,2	10	15,2	14	42,6			
321	14	17	35	15	15	24	27	10	12	14	49,4			
322	14	22	35	15	15	24	24,4	10	9,4	14	56,1			
323	14	27	35	15	15	24	22,1	10	7,1	14	63,1			
324	14	32	35	15	15	24	19,8	10	4,8	14	71,1			
325	14	2	40	15	15	24	35,9	10	20,9	14	33,8			
326	14	7	40	15	15	24	30,9	10	15,9	14	41,4			
327	14	12	40	15	15	24	27,5	10	12,5	14	48,2			
328	14	17	40	15	15	24	24,8	10	9,8	14	55,0			
329	14	22	40	15	15	24	22,5	10	7,5	14	61,8			
330	14	27	40	15	15	24	19,7	10	4,7	14	71,4			
331	14	32	40	15	15	24	18,5	10	3,5	14	76,0			
332	14	2	45	15	15	24	32,4	10	17,4	14	38,8			
333	14	7	45	15	15	24	28,1	10	13,1	14	46,9			
334	14	12	45	15	15	24	25,2	10	10,2	14	53,9			
335	14	17	45	15	15	24	22,8	10	7,8	14	60,9			
336	14	22	45	15	15	24	20,7	10	5,7	14	67,8			
337	14	27	45	15	15	24	18,8	10	3,8	14	74,8			
338	14	32	45	15	15	24	17,4	10	2,4	14	80,3			
339	14	2	20	17	15	24	64,1	10	49,1	14	15,9			
340	14	7	20	17	15	24	54,2	10	39,2	14	19,7			
341	14	12	20	17	15	24	46,9	10	31,9	14	23,7			
342	14	17	20	17	15	24	41,4	10	26,4	14	27,9			
343	14	22	20	17	15	24	36,3	10	21,3	14	33,3			

SIMULAÇÃO	H (m)	C (kPa)	fi (º)	Gama (kN/m³)	Pontos				delta X	delta y	alfa (º)			
					1		2							
					x	y	x	y						
344	14	27	20	17	15	24	32,3	10	17,3	14	39,0			
345	14	32	20	17	15	24	29,1	10	14,1	14	44,8			
346	14	2	25	17	15	24	53,4	10	38,4	14	20,0			
347	14	7	25	17	15	24	45,5	10	30,5	14	24,7			
348	14	12	25	17	15	24	39,8	10	24,8	14	29,4			
349	14	17	25	17	15	24	35,4	10	20,4	14	34,5			
350	14	22	25	17	15	24	31,7	10	16,7	14	40,0			
351	14	27	25	17	15	24	28,7	10	13,7	14	45,6			
352	14	32	25	17	15	24	25,9	10	10,9	14	52,1			
353	14	2	30	17	15	24	46	10	31	14	24,3			
354	14	7	30	17	15	24	39,6	10	24,6	14	29,6			
355	14	12	30	17	15	24	35	10	20	14	35,0			
356	14	17	30	17	15	24	31,4	10	16,4	14	40,5			
357	14	22	30	17	15	24	28,3	10	13,3	14	46,5			
358	14	27	30	17	15	24	25,8	10	10,8	14	52,4			
359	14	32	30	17	15	24	23,6	10	8,6	14	58,4			
360	14	2	35	17	15	24	40,5	10	25,5	14	28,8			
361	14	7	35	17	15	24	35,1	10	20,1	14	34,9			
362	14	12	35	17	15	24	31,2	10	16,2	14	40,8			
363	14	17	35	17	15	24	28,2	10	13,2	14	46,7			
364	14	22	35	17	15	24	25,7	10	10,7	14	52,6			
365	14	27	35	17	15	24	23,6	10	8,6	14	58,4			
366	14	32	35	17	15	24	20,6	10	5,6	14	68,2			
367	14	2	40	17	15	24	36,2	10	21,2	14	33,4			
368	14	7	40	17	15	24	31,6	10	16,6	14	40,1			
369	14	12	40	17	15	24	28,4	10	13,4	14	46,3			
370	14	17	40	17	15	24	25,7	10	10,7	14	52,6			
371	14	22	40	17	15	24	23,6	10	8,6	14	58,4			
372	14	27	40	17	15	24	21,6	10	6,6	14	64,8			
373	14	32	40	17	15	24	19,6	10	4,6	14	71,8			
374	14	2	45	17	15	24	32,7	10	17,7	14	38,3			
375	14	7	45	17	15	24	28,7	10	13,7	14	45,6			
376	14	12	45	17	15	24	25,9	10	10,9	14	52,1			
377	14	17	45	17	15	24	23,7	10	8,7	14	58,1			
378	14	22	45	17	15	24	21,8	10	6,8	14	64,1			
379	14	27	45	17	15	24	19,7	10	4,7	14	71,4			
380	14	32	45	17	15	24	18,4	10	3,4	14	76,3			
381	14	2	20	19	15	24	64,8	10	49,8	14	15,7			
382	14	7	20	19	15	24	55,3	10	40,3	14	19,2			
383	14	12	20	19	15	24	48,6	10	33,6	14	22,6			
384	14	17	20	19	15	24	43,1	10	28,1	14	26,5			
385	14	22	20	19	15	24	38,5	10	23,5	14	30,8			
386	14	27	20	19	15	24	34,5	10	19,5	14	35,7			

SIMULAÇÃO	H (m)	C (kPa)	fi (º)	Gama (kN/m³)	Pontos				delta X	delta y	alfa (º)			
					1		2							
					x	y	x	y						
387	14	32	20	19	15	24	31,3	10	16,3	14	40,7			
388	14	2	25	19	15	24	53,8	10	38,8	14	19,8			
389	14	7	25	19	15	24	46,5	10	31,5	14	24,0			
390	14	12	25	19	15	24	41,2	10	26,2	14	28,1			
391	14	17	25	19	15	24	36,9	10	21,9	14	32,6			
392	14	22	25	19	15	24	33,3	10	18,3	14	37,4			
393	14	27	25	19	15	24	30,3	10	15,3	14	42,5			
394	14	32	25	19	15	24	27,7	10	12,7	14	47,8			
395	14	2	30	19	15	24	46,4	10	31,4	14	24,0			
396	14	7	30	19	15	24	40,3	10	25,3	14	29,0			
397	14	12	30	19	15	24	36	10	21	14	33,7			
398	14	17	30	19	15	24	32,5	10	17,5	14	38,7			
399	14	22	30	19	15	24	29,7	10	14,7	14	43,6			
400	14	27	30	19	15	24	27,1	10	12,1	14	49,2			
401	14	32	30	19	15	24	25	10	10	14	54,5			
402	14	2	35	19	15	24	40,8	10	25,8	14	28,5			
403	14	7	35	19	15	24	35,7	10	20,7	14	34,1			
404	14	12	35	19	15	24	32,1	10	17,1	14	39,3			
405	14	17	35	19	15	24	29,3	10	14,3	14	44,4			
406	14	22	35	19	15	24	26,9	10	11,9	14	49,6			
407	14	27	35	19	15	24	24,7	10	9,7	14	55,3			
408	14	32	35	19	15	24	23	10	8	14	60,3			
409	14	2	40	19	15	24	36,5	10	21,5	14	33,1			
410	14	7	40	19	15	24	32,2	10	17,2	14	39,1			
411	14	12	40	19	15	24	29,1	10	14,1	14	44,8			
412	14	17	40	19	15	24	26,6	10	11,6	14	50,4			
413	14	22	40	19	15	24	24,6	10	9,6	14	55,6			
414	14	27	40	19	15	24	22,8	10	7,8	14	60,9			
415	14	32	40	19	15	24	20,7	10	5,7	14	67,8			
416	14	2	45	19	15	24	32,9	10	17,9	14	38,0			
417	14	7	45	19	15	24	29,2	10	14,2	14	44,6			
418	14	12	45	19	15	24	26,6	10	11,6	14	50,4			
419	14	17	45	19	15	24	24,5	10	9,5	14	55,8			
420	14	22	45	19	15	24	22,7	10	7,7	14	61,2			
421	14	27	45	19	15	24	21,1	10	6,1	14	66,5			
422	14	32	45	19	15	24	19,3	10	4,3	14	72,9			
423	14	2	20	21	15	24	65,1	10	50,1	14	15,6			
424	14	7	20	21	15	24	56,5	10	41,5	14	18,6			
425	14	12	20	21	15	24	50,1	10	35,1	14	21,7			
426	14	17	20	21	15	24	44,7	10	29,7	14	25,2			
427	14	22	20	21	15	24	40,4	10	25,4	14	28,9			
428	14	27	20	21	15	24	36,6	10	21,6	14	32,9			
429	14	32	20	21	15	24	33,2	10	18,2	14	37,6			

SIMULAÇÃO	H (m)	C (kPa)	fi (º)	Gama (kN/m³)	Pontos				delta X	delta y	alfa (º)			
					1		2							
					x	y	x	y						
430	14	2	25	21	15	24	54,2	10	39,2	14	19,7			
431	14	7	25	21	15	24	47,1	10	32,1	14	23,6			
432	14	12	25	21	15	24	42,3	10	27,3	14	27,1			
433	14	17	25	21	15	24	38,3	10	23,3	14	31,0			
434	14	22	25	21	15	24	34,7	10	19,7	14	35,4			
435	14	27	25	21	15	24	31,8	10	16,8	14	39,8			
436	14	32	25	21	15	24	29,2	10	14,2	14	44,6			
437	14	2	30	21	15	24	46,7	10	31,7	14	23,8			
438	14	7	30	21	15	24	40,9	10	25,9	14	28,4			
439	14	12	30	21	15	24	36,9	10	21,9	14	32,6			
440	14	17	30	21	15	24	33,7	10	18,7	14	36,8			
441	14	22	30	21	15	24	30,8	10	15,8	14	41,5			
442	14	27	30	21	15	24	28,4	10	13,4	14	46,3			
443	14	32	30	21	15	24	26,3	10	11,3	14	51,1			
444	14	2	35	21	15	24	41	10	26	14	28,3			
445	14	7	35	21	15	24	36,3	10	21,3	14	33,3			
446	14	12	35	21	15	24	32,8	10	17,8	14	38,2			
447	14	17	35	21	15	24	30,1	10	15,1	14	42,8			
448	14	22	35	21	15	24	27,8	10	12,8	14	47,6			
449	14	27	35	21	15	24	25,8	10	10,8	14	52,4			
450	14	32	35	21	15	24	24	10	9	14	57,3			
451	14	2	40	21	15	24	36,6	10	21,6	14	32,9			
452	14	7	40	21	15	24	32,7	10	17,7	14	38,3			
453	14	12	40	21	15	24	29,7	10	14,7	14	43,6			
454	14	17	40	21	15	24	27,4	10	12,4	14	48,5			
455	14	22	40	21	15	24	25,4	10	10,4	14	53,4			
456	14	27	40	21	15	24	23,7	10	8,7	14	58,1			
457	14	32	40	21	15	24	22,2	10	7,2	14	62,8			
458	14	2	45	21	15	24	33,1	10	18,1	14	37,7			
459	14	7	45	21	15	24	29,6	10	14,6	14	43,8			
460	14	12	45	21	15	24	27,1	10	12,1	14	49,2			
461	14	17	45	21	15	24	25,1	10	10,1	14	54,2			
462	14	22	45	21	15	24	23,4	10	8,4	14	59,0			
463	14	27	45	21	15	24	21,9	10	6,9	14	63,8			
464	14	32	45	21	15	24	20,1	10	5,1	14	70,0			
465	18	2	20	15	15	28	79	10	64	18	15,7			
466	18	7	20	15	15	28	67,1	10	52,1	18	19,1			
467	18	12	20	15	15	28	58,7	10	43,7	18	22,4			
468	18	17	20	15	15	28	51,8	10	36,8	18	26,1			
469	18	22	20	15	15	28	45,7	10	30,7	18	30,4			
470	18	27	20	15	15	28	40,8	10	25,8	18	34,9			
471	18	32	20	15	15	28	36,3	10	21,3	18	40,2			
472	18	2	25	15	15	28	64,8	10	49,8	18	19,9			

SIMULAÇÃO	H (m)	C (kPa)	fi (º)	Gama (kN/m³)	Pontos				delta X	delta y	alfa (º)			
					1		2							
					x	y	x	y						
473	18	7	25	15	15	28	55,7	10	40,7	18	23,9			
474	18	12	25	15	15	28	48,6	10	33,6	18	28,2			
475	18	17	25	15	15	28	43,7	10	28,7	18	32,1			
476	18	22	25	15	15	28	38,8	10	23,8	18	37,1			
477	18	27	25	15	15	28	35,1	10	20,1	18	41,8			
478	18	32	25	15	15	28	31,6	10	16,6	18	47,3			
479	18	2	30	15	15	28	55,4	10	40,4	18	24,0			
480	18	7	30	15	15	28	47,6	10	32,6	18	28,9			
481	18	12	30	15	15	28	42,2	10	27,2	18	33,5			
482	18	17	30	15	15	28	37,7	10	22,7	18	38,4			
483	18	22	30	15	15	28	34,1	10	19,1	18	43,3			
484	18	27	30	15	15	28	30,9	10	15,9	18	48,5			
485	18	32	30	15	15	28	28,1	10	13,1	18	54,0			
486	18	2	35	15	15	28	48,2	10	33,2	18	28,5			
487	18	7	35	15	15	28	41,8	10	26,8	18	33,9			
488	18	12	35	15	15	28	37,2	10	22,2	18	39,0			
489	18	17	35	15	15	28	33,6	10	18,6	18	44,1			
490	18	22	35	15	15	28	30,4	10	15,4	18	49,5			
491	18	27	35	15	15	28	27,8	10	12,8	18	54,6			
492	18	32	35	15	15	28	25,5	10	10,5	18	59,7			
493	18	2	40	15	15	28	42,6	10	27,6	18	33,1			
494	18	7	40	15	15	28	37,2	10	22,2	18	39,0			
495	18	12	40	15	15	28	33,2	10	18,2	18	44,7			
496	18	17	40	15	15	28	30,2	10	15,2	18	49,8			
497	18	22	40	15	15	28	27,4	10	12,4	18	55,4			
498	18	27	40	15	15	28	25,2	10	10,2	18	60,5			
499	18	32	40	15	15	28	22,7	10	7,7	18	66,8			
500	18	2	45	15	15	28	38,1	10	23,1	18	37,9			
501	18	7	45	15	15	28	33,3	10	18,3	18	44,5			
502	18	12	45	15	15	28	30,1	10	15,1	18	50,0			
503	18	17	45	15	15	28	27,3	10	12,3	18	55,7			
504	18	22	45	15	15	28	25,1	10	10,1	18	60,7			
505	18	27	45	15	15	28	23	10	8	18	66,0			
506	18	32	45	15	15	28	20,6	10	5,6	18	72,7			
507	18	2	20	17	15	28	79,9	10	64,9	18	15,5			
508	18	7	20	17	15	28	68,5	10	53,5	18	18,6			
509	18	12	20	17	15	28	60,8	10	45,8	18	21,5			
510	18	17	20	17	15	28	54	10	39	18	24,8			
511	18	22	20	17	15	28	48,4	10	33,4	18	28,3			
512	18	27	20	17	15	28	43,6	10	28,6	18	32,2			
513	18	32	20	17	15	28	39,7	10	24,7	18	36,1			
514	18	2	25	17	15	28	65,4	10	50,4	18	19,7			
515	18	7	25	17	15	28	56,7	10	41,7	18	23,3			

SIMULAÇÃO	H (m)	C (kPa)	fi (º)	Gama (kN/m³)	Pontos				delta X	delta y	alfa (º)			
					1		2							
					x	y	x	y						
516	18	12	25	17	15	28	50,6	10	35,6	18	26,8			
517	18	17	25	17	15	28	45,5	10	30,5	18	30,5			
518	18	22	25	17	15	28	41,4	10	26,4	18	34,3			
519	18	27	25	17	15	28	37,4	10	22,4	18	38,8			
520	18	32	25	17	15	28	34,2	10	19,2	18	43,2			
521	18	2	30	17	15	28	55,8	10	40,8	18	23,8			
522	18	7	30	17	15	28	48,6	10	33,6	18	28,2			
523	18	12	30	17	15	28	43,5	10	28,5	18	32,3			
524	18	17	30	17	15	28	39,5	10	24,5	18	36,3			
525	18	22	30	17	15	28	35,9	10	20,9	18	40,7			
526	18	27	30	17	15	28	32,8	10	17,8	18	45,3			
527	18	32	30	17	15	28	30,3	10	15,3	18	49,6			
528	18	2	35	17	15	28	48,6	10	33,6	18	28,2			
529	18	7	35	17	15	28	42,8	10	27,8	18	32,9			
530	18	12	35	17	15	28	38,3	10	23,3	18	37,7			
531	18	17	35	17	15	28	34,9	10	19,9	18	42,1			
532	18	22	35	17	15	28	31,9	10	16,9	18	46,8			
533	18	27	35	17	15	28	29,5	10	14,5	18	51,1			
534	18	32	35	17	15	28	27,1	10	12,1	18	56,1			
535	18	2	40	17	15	28	43	10	28	18	32,7			
536	18	7	40	17	15	28	38	10	23	18	38,0			
537	18	12	40	17	15	28	34,2	10	19,2	18	43,2			
538	18	17	40	17	15	28	31,4	10	16,4	18	47,7			
539	18	22	40	17	15	28	28,7	10	13,7	18	52,7			
540	18	27	40	17	15	28	26,6	10	11,6	18	57,2			
541	18	32	40	17	15	28	24,7	10	9,7	18	61,7			
542	18	2	45	17	15	28	38,4	10	23,4	18	37,6			
543	18	7	45	17	15	28	33,9	10	18,9	18	43,6			
544	18	12	45	17	15	28	30,9	10	15,9	18	48,5			
545	18	17	45	17	15	28	28,4	10	13,4	18	53,3			
546	18	22	45	17	15	28	26,1	10	11,1	18	58,3			
547	18	27	45	17	15	28	24,2	10	9,2	18	62,9			
548	18	32	45	17	15	28	22,6	10	7,6	18	67,1			
549	18	2	20	19	15	28	80,5	10	65,5	18	15,4			
550	18	7	20	19	15	28	70,3	10	55,3	18	18,0			
551	18	12	20	19	15	28	62,4	10	47,4	18	20,8			
552	18	17	20	19	15	28	56,4	10	41,4	18	23,5			
553	18	22	20	19	15	28	50,8	10	35,8	18	26,7			
554	18	27	20	19	15	28	46,4	10	31,4	18	29,8			
555	18	32	20	19	15	28	42,4	10	27,4	18	33,3			
556	18	2	25	19	15	28	66	10	51	18	19,4			
557	18	7	25	19	15	28	58,2	10	43,2	18	22,6			
558	18	12	25	19	15	28	52,1	10	37,1	18	25,9			

SIMULAÇÃO	H (m)	C (kPa)	fi (º)	Gama (kN/m³)	Pontos				delta X	delta y	alfa (º)			
					1		2							
					x	y	x	y						
559	18	17	25	19	15	28	46,9	10	31,9	18	29,4			
560	18	22	25	19	15	28	42,8	10	27,8	18	32,9			
561	18	27	25	19	15	28	39,4	10	24,4	18	36,4			
562	18	32	25	19	15	28	36,3	10	21,3	18	40,2			
563	18	2	30	19	15	28	56,1	10	41,1	18	23,7			
564	18	7	30	19	15	28	49,4	10	34,4	18	27,6			
565	18	12	30	19	15	28	44,9	10	29,9	18	31,0			
566	18	17	30	19	15	28	40,9	10	25,9	18	34,8			
567	18	22	30	19	15	28	37,3	10	22,3	18	38,9			
568	18	27	30	19	15	28	34,7	10	19,7	18	42,4			
569	18	32	30	19	15	28	32	10	17	18	46,6			
570	18	2	35	19	15	28	48,8	10	33,8	18	28,0			
571	18	7	35	19	15	28	43,3	10	28,3	18	32,5			
572	18	12	35	19	15	28	39,4	10	24,4	18	36,4			
573	18	17	35	19	15	28	36,1	10	21,1	18	40,5			
574	18	22	35	19	15	28	33,2	10	18,2	18	44,7			
575	18	27	35	19	15	28	30,8	10	15,8	18	48,7			
576	18	32	35	19	15	28	28,7	10	13,7	18	52,7			
577	18	2	40	19	15	28	43,3	10	28,3	18	32,5			
578	18	7	40	19	15	28	38,5	10	23,5	18	37,5			
579	18	12	40	19	15	28	35,1	10	20,1	18	41,8			
580	18	17	40	19	15	28	32,4	10	17,4	18	46,0			
581	18	22	40	19	15	28	29,8	10	14,8	18	50,6			
582	18	27	40	19	15	28	27,8	10	12,8	18	54,6			
583	18	32	40	19	15	28	25,9	10	10,9	18	58,8			
584	18	2	45	19	15	28	38,6	10	23,6	18	37,3			
585	18	7	45	19	15	28	34,5	10	19,5	18	42,7			
586	18	12	45	19	15	28	31,5	10	16,5	18	47,5			
587	18	17	45	19	15	28	29,1	10	14,1	18	51,9			
588	18	22	45	19	15	28	27	10	12	18	56,3			
589	18	27	45	19	15	28	25,4	10	10,4	18	60,0			
590	18	32	45	19	15	28	23,7	10	8,7	18	64,2			
591	18	2	20	21	15	28	81,4	10	66,4	18	15,2			
592	18	7	20	21	15	28	71,3	10	56,3	18	17,7			
593	18	12	20	21	15	28	64,4	10	49,4	18	20,0			
594	18	17	20	21	15	28	58,4	10	43,4	18	22,5			
595	18	22	20	21	15	28	53	10	38	18	25,3			
596	18	27	20	21	15	28	48,7	10	33,7	18	28,1			
597	18	32	20	21	15	28	44,8	10	29,8	18	31,1			
598	18	2	25	21	15	28	66,6	10	51,6	18	19,2			
599	18	7	25	21	15	28	58,9	10	43,9	18	22,3			
600	18	12	25	21	15	28	53,2	10	38,2	18	25,2			
601	18	17	25	21	15	28	48,7	10	33,7	18	28,1			

SIMULAÇÃO	H (m)	C (kPa)	fi (º)	Gama (kN/m³)	Pontos				delta X	delta y	alfa (º)			
					1		2							
					x	y	x	y						
602	18	22	25	21	15	28	44,7	10	29,7	18	31,2			
603	18	27	25	21	15	28	41,2	10	26,2	18	34,5			
604	18	32	25	21	15	28	38,2	10	23,2	18	37,8			
605	18	2	30	21	15	28	56,4	10	41,4	18	23,5			
606	18	7	30	21	15	28	50,3	10	35,3	18	27,0			
607	18	12	30	21	15	28	45,9	10	30,9	18	30,2			
608	18	17	30	21	15	28	41,9	10	26,9	18	33,8			
609	18	22	30	21	15	28	38,7	10	23,7	18	37,2			
610	18	27	30	21	15	28	36	10	21	18	40,6			
611	18	32	30	21	15	28	33,5	10	18,5	18	44,2			
612	18	2	35	21	15	28	49,2	10	34,2	18	27,8			
613	18	7	35	21	15	28	44	10	29	18	31,8			
614	18	12	35	21	15	28	40,2	10	25,2	18	35,5			
615	18	17	35	21	15	28	37,1	10	22,1	18	39,2			
616	18	22	35	21	15	28	34,5	10	19,5	18	42,7			
617	18	27	35	21	15	28	32,1	10	17,1	18	46,5			
618	18	32	35	21	15	28	30	10	15	18	50,2			
619	18	2	40	21	15	28	43,4	10	28,4	18	32,4			
620	18	7	40	21	15	28	38,9	10	23,9	18	37,0			
621	18	12	40	21	15	28	35,8	10	20,8	18	40,9			
622	18	17	40	21	15	28	33,2	10	18,2	18	44,7			
623	18	22	40	21	15	28	30,9	10	15,9	18	48,5			
624	18	27	40	21	15	28	28,9	10	13,9	18	52,3			
625	18	32	40	21	15	28	27,1	10	12,1	18	56,1			
626	18	2	45	21	15	28	38,8	10	23,8	18	37,1			
627	18	7	45	21	15	28	34,9	10	19,9	18	42,1			
628	18	12	45	21	15	28	32,2	10	17,2	18	46,3			
629	18	17	45	21	15	28	29,9	10	14,9	18	50,4			
630	18	22	45	21	15	28	27,9	10	12,9	18	54,4			
631	18	27	45	21	15	28	26,2	10	11,2	18	58,1			
632	18	32	45	21	15	28	24,6	10	9,6	18	61,9			

## APÊNDICE B – PLANILHA DE GERAÇÃO DA EQUAÇÃO

Alfa simu	Alfa model	Erro Médio	A	B	C	D	k	l	m	n	nº simu
18,34	33,59	2,413%	-0,554	0,012	0,823	461,682	-8,843	2,057	1,105	-1,608	632
29,51	38,89	1,484%									
44,53	44,64	0,019%									
65,77	50,67	2,390%									
77,77	56,88	3,306%									
23,20	37,04	2,190%									
36,19	42,34	0,973%									
51,34	48,10	0,513%									
69,03	54,12	2,359%									
27,97	41,31	2,111%									
42,27	46,61	0,686%									
57,65	52,37	0,836%									
74,18	58,39	2,499%									
32,83	46,41	2,148%									
48,54	51,71	0,500%									
68,20	57,46	1,699%									
79,61	63,48	2,552%									
37,93	52,33	2,279%									
54,37	57,63	0,516%									
71,57	63,39	1,294%									
83,35	69,41	2,205%									
43,60	59,10	2,452%									
59,74	64,40	0,736%									
75,07	70,15	0,778%									
87,14	76,18	1,735%									
17,88	33,59	2,486%									
27,15	38,89	1,857%									
39,42	44,64	0,827%									
54,37	50,67	0,586%									
70,71	56,88	2,188%									
81,47	63,25	2,884%									
22,62	37,04	2,282%									
33,40	42,34	1,415%									
46,47	48,10	0,258%									
65,77	54,12	1,844%									
76,87	60,33	2,616%									
86,19	66,70	3,083%									
27,35	41,31	2,209%									
39,42	46,61	1,138%									
53,13	52,37	0,121%									
68,20	58,39	1,552%									
80,54	64,60	2,521%									

$$\alpha = A\gamma_n^k + B\varphi^l + Cc^m + DH^n$$

$$\Theta = f(\gamma_n; \varphi; c; H)$$

$\Theta$  = inclinação

$\gamma_n$  = peso específico

$\varphi$  = ângulo de atrito

$c$  = coesão

$H$  = altura



























