



UNIVERSIDADE
ESTADUAL de LONDRINA

ALEX MORIN CARNEIRO

**COMPARATIVO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO
SOLO OBTIDOS POR DOIS MÉTODOS DE RETROANÁLISE:
ESTUDO FUNDAMENTADO EM UM TALUDE REAL**

Londrina

2026

ALEX MORIN CARNEIRO

**COMPARATIVO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO
SOLO OBTIDOS POR DIFERENTES MÉTODOS DE
RETROANÁLISE:
ESTUDO FUNDAMENTADO EM UM TALUDE REAL**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Raquel Souza Teixeira

Londrina

2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

C289c Carneiro, Alex Morin.
Comparativo de parâmetros de resistência do solo obtidos por diferentes métodos de retroanálise : Estudo fundamentado em um talude real / Alex Morin Carneiro. - Londrina, 2026.
106 f.

Orientador: Raquel Souza Teixeira.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2026.
Inclui bibliografia.

1. Sucção matricial - Tese. 2. Estabilidade de taludes - Tese. 3. Retroanálise - Tese. 4. Solo não saturado - Tese. I. Teixeira, Raquel Souza. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU 62

ALEX MORIN CARNEIRO

**COMPARATIVO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO SOLO
OBTIDOS POR DIFERENTES MÉTODOS DE RETROANÁLISE:
ESTUDO FUNDAMENTADO EM UM TALUDE REAL**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Raquel Souza Teixeira
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Profa. Dra. Alana Dias de Oliveira
Universidade Tecnológica Federal do Paraná –
UTFPR Toledo

Prof. Dr. Gilson de Farias Neves Gitirana Junior
- Universidade Federal de Goiás - UFG

Londrina, 08 de maio de 2026.

CARNEIRO, Alex Morin. **Comparativo de parâmetros de resistência do solo obtidos por diferentes métodos de retroanálise: Estudo fundamentado em um talude real**. 2026. 106f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2026.

RESUMO

A retroanálise de taludes é uma ferramenta fundamental para compreensão dos causadores e condições que acarretam os movimentos de massa, permitindo também o desenvolvimento de planos de contingência de eventos futuros. No entanto, metodologias para esse tipo de análise ainda estão sendo propostas, buscando suprir a variabilidade existente nas condições em que taludes se apresentam. Além disso, diferentes abordagens aplicadas a um mesmo maciço de solo ainda demonstram divergências em seus resultados, dificultando a análise. Dessa maneira, este estudo foca em avaliar os parâmetros de resistência de um talude real obtidos por retroanálise na condição não saturada (baseada na distribuição de sucção do talude no momento da ruptura), comparando semelhanças e divergências para uma análise pós-ruptura ocasionada por um período de intensa precipitação. A primeira metodologia foi proposta por Oliveira (2024), a qual busca uma abordagem de ampla aplicabilidade por meio de programação. Neste estudo, sua aplicação permitiu uma análise bidimensional do talude considerando o solo não saturado e com um plano de ruptura não circular. Na sequência, aplicou-se a metodologia de Gomes (2003), que está consolidada na literatura e já foi aplicada em condições de contorno semelhantes, tudo por meio do software PLAXIS LE V21. Somado a isso, foram utilizados resultados de ensaios em laboratório dos parâmetros de resistência do solo para pautar os comparativos. Ao final das análises, ao determinar uma distribuição de poropressão com base nos registros pluviométricos da data de ruptura, obteve-se um ângulo de atrito efetivo (ϕ') de 16° e coesão efetiva (c') de 1kPa para o método de Oliveira (2024) e $\phi' = 18^\circ$ e $c' = 0,1\text{kPa}$ para o método de Gomes (2003), demonstrando uma semelhança entre valores que, por sua vez, demandaram uma verificação da superfície de ruptura para quantificar a proximidade destes com o evento de ruptura analisado. Em laboratório, os parâmetros de resistência da camada resultaram em $\phi' = 23^\circ$ e $c' = 3,2\text{kPa}$, obtidos por meio do ensaio de cisalhamento direto. Observou-se que o método de Oliveira (2024) apresentou resultados com menor proximidade dos valores de laboratório, com destaque para o ângulo de atrito, já que esta propriedade demonstra menos variações devido à oscilação da poropressão no talude quando se considera essa não saturação do solo. Relativo à superfície de ruptura gerada, embora nenhum dos métodos tenha alcançado a superfície real, no método de Gomes (2003) houve uma maior similaridade com a superfície observada em campo, tornando-o mais representativo para este evento em específico. Embora haja essa maior representatividade de Gomes, pela ampla aplicabilidade que Oliveira (2024) propõe, um maior volume de estudos se faz necessário para obtenção de conclusões concretas sobre o desempenho desta recente metodologia de retroanálise, visto que também há incertezas e certa complexidade nesta análise não saturada do solo partindo de variações de sucção definidas por uma análise de percolação no talude.

Palavras-chave: Retroanálise; Sucção matricial; Estudo comparativo; Solo não saturado; Estabilidade de taludes; PLAXIS LE

CARNEIRO, Alex Morin. **Comparative analysis of soil strength parameters obtained by different back-analysis methods: A study based on a real slope.** 2026. 106f. Dissertation (Master's Degree) – Center of Technology and Urbanism, State University of Londrina, Londrina, 2026.

ABSTRACT

Slope back-analysis is a fundamental tool for understanding the causes and conditions that lead to mass movements, while also supporting the development of contingency plans for future events. However, methodologies for this type of analysis are still being proposed in an effort to address the variability of conditions under which slopes occur. Furthermore, different approaches applied to the same soil mass often yield divergent results, making interpretation more challenging. Therefore, this study focuses on evaluating the strength parameters of a real slope obtained through back-analysis under unsaturated conditions (based on the slope suction distribution at the time of failure), comparing similarities and differences in a post-failure analysis triggered by a period of intense rainfall. The first methodology was proposed by Oliveira (2024), aiming to provide a broadly applicable approach through programming techniques. In this study, its application enabled a two-dimensional slope analysis considering unsaturated soil conditions and a non-circular failure surface. Subsequently, the methodology proposed by Gomes (2003), which is well established in the literature and has already been applied under similar boundary conditions, was implemented using PLAXIS LE V21 software. In addition, laboratory test results for soil strength parameters were used as a basis for comparison. At the end of the analyses, by determining a pore-pressure distribution based on rainfall records from the date of failure, an effective friction angle (ϕ') of 16° and an effective cohesion (c') of 1 kPa were obtained using Oliveira's (2024) method, while Gomes' (2003) method resulted in $\phi' = 18^\circ$ and $c' = 0.1$ kPa. These results demonstrated a degree of similarity between the estimated parameters; however, verification of the failure surface was required to quantify their correspondence with the observed failure event. Laboratory testing of the soil layer yielded strength parameters of $\phi' = 23^\circ$ and $c' = 3.2$ kPa, obtained through direct shear testing. It was observed that Oliveira's (2024) method produced results that were less consistent with the laboratory values, particularly regarding the friction angle, since this property tends to exhibit smaller variations due to pore-pressure fluctuations in the slope when unsaturated soil conditions are considered. Concerning the generated failure surface, although neither method reproduced the actual failure surface, Gomes' (2003) method showed greater similarity to the surface observed in the field, making it more representative of the specific failure event analyzed. Despite the greater representativeness of Gomes' method, the broad applicability proposed by Oliveira (2024) highlights the need for additional studies to draw more definitive conclusions regarding the performance of this recent back-analysis methodology. This is particularly important given the uncertainties and complexity associated with unsaturated soil analysis based on suction variations derived from seepage analyses within the slope.

Key-words: Back-analysis; Matric suction; Comparative study; Unsaturated soil; Slope stability; PLAXIS LE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da zona cisalhada em um talude.	17
Figura 2 – Número de escorregamentos de terra fatais reportados até 2017.	18
Figura 3 – Tempo de falha x intensidade de água x ângulo do talude (A) e umidade volumétrica de falha x intensidade de água x ângulo do talude (B).	19
Figura 4 – Mecanismos de resistência ao cisalhamento do solo.....	23
Figura 5 – Esquema demonstrativo de atrito entre dois corpos.	23
Figura 6 – Esquema da ação da água no atrito do solo.	24
Figura 7 – Analogia física de resistência do solo.	25
Figura 8 – Formação de zonas de infiltração preferencias no solo.	26
Figura 9 – Perfil de solo não saturado e pressões na água intersticial.	27
Figura 10 – Esquema da separação das partículas com o aumento da umidade do solo.....	28
Figura 11 – Curva característica solo-água típica.	29
Figura 12 – Mapas de suscetibilidade de deslizamentos.	34
Figura 13 -Representação da divisão de um talude qualquer em fatias.....	36
Figura 14 – Forças atuantes em uma fatia.	36
Figura 15 – Forças atuantes nas fatias segundo o método de Fellenius.	37
Figura 16 – Forças atuantes nas fatias segundo o método de Bishop.....	38
Figura 17 – Forças atuantes nas fatias segundo o método de Jambu simplificado. .	38
Figura 18 – Forças atuantes nas fatias segundo o método de Spencer.	39
Figura 19 – Forças atuantes nas fatias segundo o método de Morgenstern-Price. ..	40
Figura 20 – Talude de estudo analisado por Fredlund e Krahn (1976).	41
Figura 21 – Sensitividade dos parâmetros de resistência da camada de preenchimento (A) e do solo coluvionar (B) que compõem a seção do talude.	44
Figura 22 – Mapa de solo do estado do Paraná.....	48
Figura 23 – Registro de campo da ruptura do talude utilizado neste estudo.....	49
Figura 24 – Vista em planta do talude rompido indicando os pontos de sondagem..	50
Figura 25 – Seção S1 do talude – Seção da área desmoronada já reconstituída indicando a superfície de ruptura observada em campo.....	51
Figura 26 – Seção S2 do talude – Seção de referência fora da área desmoronada.	52
Figura 27 – Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal e deslocamento vertical x deslocamento horizontal	55

Figura 28 – Envoltórias de ruptura do solo – Ensaios lentos.....	56
Figura 29 – Coesão (c) x sucção estimada do solo indeformado.....	56
Figura 30 – Curva característica dos solos não saturados do talude.....	57
Figura 31 – Curva estimada da condutividade hidráulica x sucção dos solos não saturados no talude.....	58
Figura 32 – Etapas da metodologia da pesquisa.	59
Figura 33 – Seção do talude modelada no PLAXIS LE V21 destacando os limites de superfície de ruptura.	61
Figura 34 – Histórico de precipitação em Londrina de 2000 a 2013.	62
Figura 35 – Seção do talude com distribuição da poropressão do autor (A) e resultado de Pelaquim (2021) (B).	64
Figura 36 – Fluxograma do método proposto por Oliveira.	66
Figura 37 – Superfície de ruptura especificada pelo método <i>fully specified</i>	68
Figura 38 – Superfícies críticas geradas pelo método de Oliveira (2024).	72
Figura 39 – Superfície crítica obtida sem uso de limites de entrada e saída.	73
Figura 40 – Distribuição da poropressão com chuva estimada.....	76
Figura 41 – Superfícies críticas geradas pelo método de Oliveira (2024) na segunda hipótese de distribuição de poropressão do talude.	77
Figura 42 – Superfície crítica encontrada a partir do método de Gomes (2003), comparando com as demais superfícies.	81

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Precipitações diárias anual para cada um dos meses, indicando a mediana do mês de dezembro.....	75
Gráfico 2 - Curva coesão efetiva x ângulo de atrito efetivo.	78
Gráfico 3 – Fatores de segurança obtido do método de Gomes (2003).....	80
Gráfico 4 – Curva coesão efetiva x ângulo de atrito efetivo com dados das duas metodologias de retroanálise.	82
Gráfico 5 –Fator de segurança x variações dos parâmetros de resistência do solo.	85

LISTA DE QUDROS

Quadro 1 - Classificação simplificada dos movimentos de massa.	20
Quadro 2 – Equações de ajuste de curvas características solo-água unimodais.....	29
Quadro 3- Nível de segurança contra a perda de vidas humanas	32
Quadro 4 - Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais.....	33
Quadro 5 – Fator de segurança mínimo para deslizamentos.....	33
Quadro 6 - Metodologias de retroanálise existentes na literatura.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de resistência para diferentes sucções matriciais.	30
Tabela 2 – Fatores de segurança calculados por Fredlund e Krahn (1976).....	41
Tabela 3 – Parâmetros de resistência obtidos em laboratório para este talude.	54
Tabela 4 – Envoltórias de cisalhamento do solo – ensaios lentos	56
Tabela 5 – Parâmetros hidráulicos de entrada no software para simulações de comportamento hidráulico do talude.	63
Tabela 6 – Resumo dos resultados do método de Oliveira (2024).....	70
Tabela 7 – Parâmetros de resistência testados para o método de Gomes (2003)....	79
Tabela 8 – Parâmetros de resistência do solo obtidos de retroanálises e ensaios. ..	83
Tabela 9 – Tabela completa dos resultados obtidos da aplicação do método de Oliveira (2024).....	102

LISTA DE SÍMBOLOS

c	Coesão
φ	Ângulo de atrito
c'	Coesão efetiva
φ'	Ângulo de atrito efetivo
σ	Tensão normal
τ	Tensão cisalhante
Ψ	Sucção matricial
S	Grau de saturação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	14
2	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1	TALUDES	17
3.1.1	Movimentos de massa	19
3.2	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO	22
3.2.1	Resistência em solos saturados	23
3.2.2	Resistência em solos não saturados	26
3.3	SEGURANÇA EM ESTABILIDADE DE TALUDES	32
3.4	MÉTODOS DE ESTABILIDADE DE TALUDES	34
3.4.1	Estabilidade por equilíbrio limite	35
3.4.2	Método de Fellenius	36
3.4.3	Método de Bishop simplificado	37
3.4.4	Método de Jambu simplificado	38
3.4.5	Método de Spencer	38
3.4.6	Método de Morgenstern-Price	39
3.5	ESTUDOS COM RETROANÁLISE	42
4	CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO EM ESTUDO	48
4.1	TIPOLOGIA DO SOLO REGIONAL	48
4.2	CASO EM ESTUDO	49
5	MATERIAIS E MÉTODOS	59
5.1	METODOLOGIA DE ESTUDO	59
5.2	SEÇÃO DO TALUDE E SUPERFÍCIE CRÍTICA	60
5.3	PERFIL DE DISTRIBUIÇÃO DA POROPRESSÃO NO TALUDE	62
5.4	MÉTODOS DE RETROANÁLISE APLICADOS	65
5.4.1	Método proposto por Oliveira (2024)	65
5.4.2	Método de Gomes (2003)	67
5.5	ANÁLISE COMPARATIVA E SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DO SOLO	68
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
6.1	Método de Oliveira (2024)	70
6.1.1	Fase 2 de análise de poropressão	74
6.2	Método de Gomes (2003)	78

6.3	Análise comparativa dos parâmetros de resistência do solo	82
7	CONCLUSÕES	86
8	TÓPICOS PARA ESTUDOS FUTUROS.....	88
	REFERÊNCIAS.....	89
	APÊNDICES	96
	APÊNDICE A – SONDAgens REALIZADAS NA SEÇÃO DO TALUDE.....	97
	APÊNDICE B – TABELA COMPLETA DE RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE RETROANÁLISE DE OLIVEIRA (2024)	102

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Frente ao desenvolvimento constante de áreas urbanizadas, a necessidade de eficiência em obras, principalmente de infraestrutura, evolui progressivamente. Tais obras de engenharia, como estradas, viadutos, barragens e empreendimentos em geral que enfrentam problemas de variações topográficas acentuadas em sua implantação, tornam a estabilidade de taludes uma questão crucial para garantir a segurança e viabilidade destas obras.

A estabilidade de taludes é uma vertente fundamental da geotecnia para garantir a segurança frente a movimentos de massa, que são movimentos naturais complexos que podem assumir grandes escalas. Além disso, fatores externos podem ser agentes deflagradores que contribuem para a ocorrência desses eventos, como altos índices de pluviosidade que afetam a estabilidade de um maciço de solo por influenciar nas condições de saturação do solo. Correlações entre tempo de ruptura de um talude, volume de água e inclinação do talude já são possíveis, como feito por CHEN *et al.* (2020), o que evidencia a necessidade da compreensão do comportamento de um talude frente à condição saturada e não saturada, garantindo o atendimento aos limites mínimos de segurança regidos pela NBR 11682:2009.

Existem inúmeros indicadores que permitem quantificar atenuações na estabilidade de um talude em campo, como variações na inclinação superficial ou deslocamentos internos, por exemplo, mas há casos em que além da dificuldade de se trabalhar com tais indicadores também devem ser considerados fatores externos, como o custo de implantação e manutenção destes equipamentos de monitoramento e a dimensão do talude. Tais ponderações dificultam a aplicabilidade destas alternativas e demandam outras técnicas para garantir a segurança neste talude.

Dessa maneira, a retroanálise tem ganhado espaço e é frequentemente aplicada na geotecnia para investigação de problemas de ruptura de maciços de solo, em obras como aterros, barragens ou até mesmo em encostas. No entanto, a tendência de se assumir cenários mais conservadores durante o dimensionamento desse tipo de obra, devido às incertezas quanto aos parâmetros de resistência do solo ou a falta de investigações destes, podem afetar os resultados obtidos por retroanálise. (DESCHAMPS; YANKEY, 2006).

Além disso, ao desenvolver este tipo de análise é imprescindível que haja um conhecimento prévio das metodologias e condições de aplicação para a

situação em estudo. Há uma gama de autores propondo seus métodos que impõem condições pré-fixadas para que sua aplicação seja possível, como um talude saturado ou com uma forma de superfície de ruptura circular. Neste cenário, ao se realizar uma retroanálise sem conhecimento prévio dos métodos disponíveis, a incerteza quanto ao método pode se tornar um agravante à qualidade dos resultados.

Tendo em vista este cenário, Oliveira (2024) propôs um método de retroanálise de taludes que engloba diversas configurações em que um talude pode se apresentar, como taludes de solo homogêneo ou heterogêneo, com saturação variável, com superfícies de ruptura circulares ou não circulares e até mesmo situações de análise 2D e 3D. No entanto, seus testes se limitaram a taludes hipotéticos, o que não permite avaliar a metodologia em condições mais complexas que estão contidas em taludes reais, como solos não saturados, geometria com maiores variações e estratigrafia mais variada.

Desse modo, comparar metodologias que estão sendo propostas com outras mais consolidadas é fundamental para entender seu comportamento em cenários reais de colapso. O método de Oliveira (2024) propõe uma maior abrangência de condições em que este pode ser aplicável, o que incide diretamente em uma problemática da retroanálise de taludes. Como comparativo pode-se utilizar o método de Gomes (2003), que permite ser aplicado sob as mesmas condições de contorno, pois está consolidado na literatura e já foi aplicado em outros trabalhos sob condições similares ao talude analisado neste estudo.

Somado a isso, resultados provenientes de ensaios de laboratório serão agregados a este comparativo, buscando embasar a avaliação destes resultados de retroanálise e expor semelhanças e divergências entre resultados de parâmetros de resistência do solo obtidos por diferentes fontes.

2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

Este estudo tem como objetivo principal avaliar duas metodologias de retroanálise em um talude real, considerando o solo em condição não saturada no momento da ruptura por meio de uma análise de distribuição da poropressão no talude. A partir deste, tem-se os seguintes objetivos específicos:

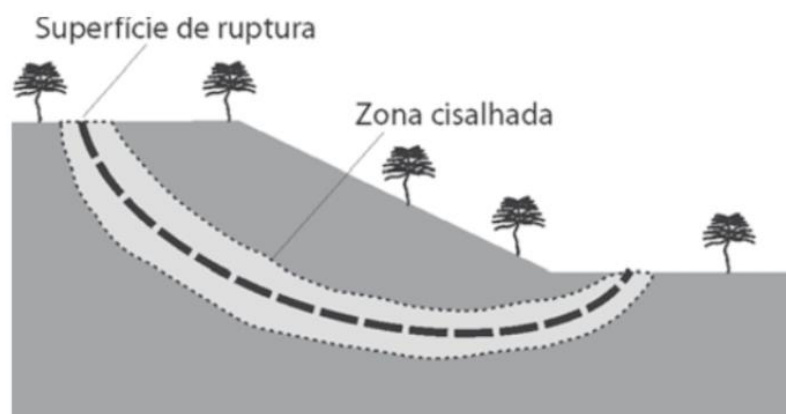
- Catalogar informações referentes às condições de contorno do talude e reconstituir a seção pré-ruptura;
- Estabelecer as condições de poropressão do talude no momento da ruptura por meio de simulações do comportamento hidráulico do maciço;
- Aplicar os métodos de retroanálise de Oliveira (2024) e de Gomes (2003) na seção pré-ruptura;
- Verificar o comportamento da superfície de ruptura gerada pelo software e similaridade à condição de ruptura observada em campo;
- Comparar os resultados dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo obtidos em análises computacionais e ensaios de laboratório;
- Discutir as vantagens e limitações de cada método frente à condição não saturada do solo em um talude

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 TALUDES

Um talude é caracterizado como qualquer tipo de superfície inclinada de uma maciço de solo ou de rocha. Sua origem pode ser devido a ação humana (aterros, por exemplo) ou pode ser resultado de fenômenos naturais ou intemperismo, que moldam uma superfície natural. Os eventos de ruptura destes maciços ocorrem pela mobilização de tensões cisalhantes que, ao atingirem o limite de resistência do material, formam uma zona cisalhada (Figura 1) que perde suas características de resistência, resultando na superfície de cisalhamento do talude.

Figura 1 – Representação da zona cisalhada em um talude.



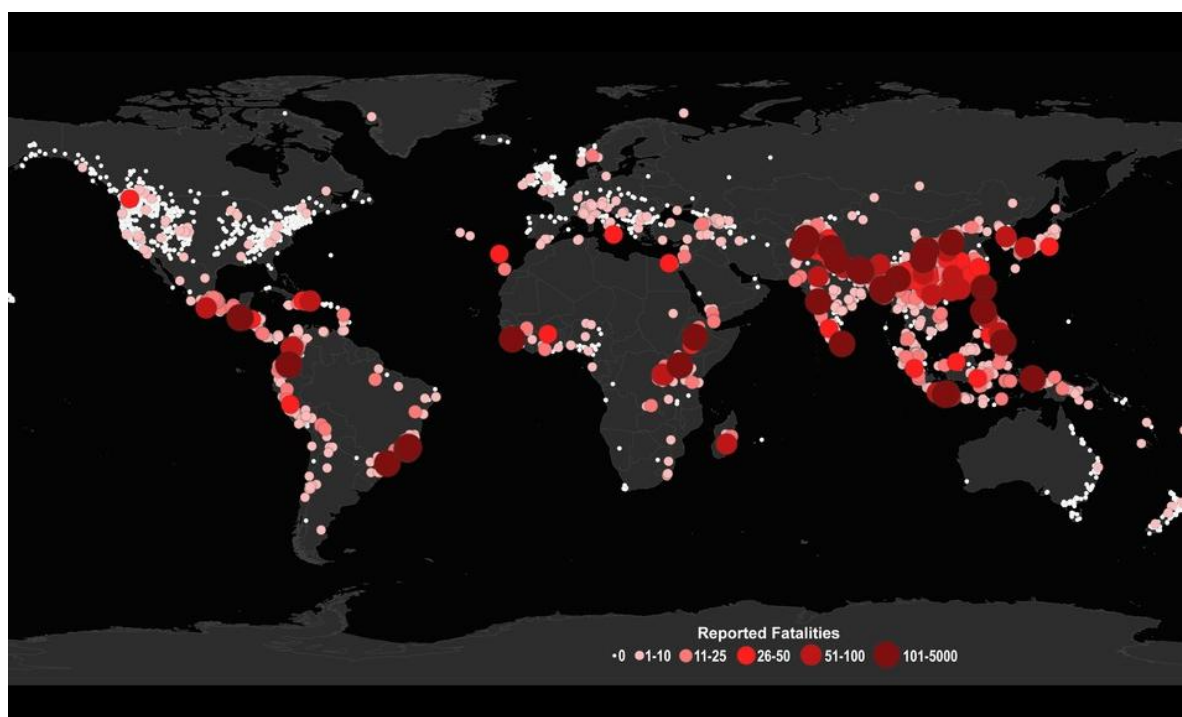
Fonte: Gerscovich (2016).

Taludes com rupturas em diferentes regiões, ou com cenários pós-ruptura que se tornam problemáticos para as regiões do entorno, são constantemente objetos de estudo, pois estes estudos de caso viabilizam estabelecer correlações entre os movimentos de massa e os diversos tipos de agentes degradantes desse tipo de obra, como infiltração decorrente de chuvas, agentes erosivos ou a própria geometria do talude (SALAH et al., 2019; ZABOLOTNII; MORGENSTERN; WILSON, 2022; MALKA et al., 2023).

A análise de estabilidade deste se torna fundamental quando movimentações de terra ou desprendimentos de rocha podem afetar a segurança de empreendimentos ou populações que ocupam o seu entorno, além de poder atingir

níveis de desastres de grande escala. Além disso, com os diversos registros de escorregamentos de terra fatais espalhados pelo mundo (Figura 2), fica ainda mais visível que há uma complexidade nesse tipo de superfície que deve ser compreendida corretamente para sua permanência de forma segura.

Figura 2 – Número de escorregamentos de terra fatais reportados até 2017.



Fonte: Nasa's Scientific Visualization Studio (2018).

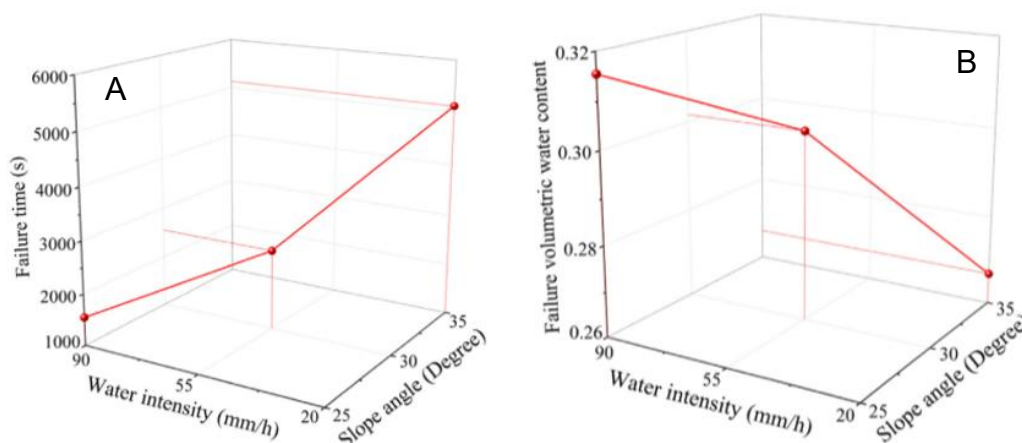
Formas de previsão destes eventos são o objeto de estudo de diversos trabalhos na área de estabilidade de taludes, com diferentes modelos sendo desenvolvidos por meio de programação para prever parâmetros como a resistência ao cisalhamento do solo ou indicar o fator de segurança para um talude (MOAYEDI *et al.*, 2020; QIAN *et al.*, 2019).

Devido à heterogeneidade do solo, estudos conduzidos em laboratório também demonstram ser ferramentas eficientes para compreender o funcionamento dos taludes nesse tipo de falha. Chen *et al.* (2020) desenvolveu um aparelho capaz de realizar ensaios de tensão de cisalhamento constante, em que o solo é submetido a cargas constantes e é posicionado em um plano inclinado conhecido. Neste cenário em que a inclinação e a tensão cisalhante estão fixadas, ciclos de secagem e umedecimento da amostra são realizados para entender o

comportamento do solo frente a essas variações de umidade, medindo deformação frente ao cisalhamento do solo e umidade volumétrica na amostra.

Por meio deste aparato, Chen *et al.* (2020) determinou algumas relações entre o ângulo do talude e a influência da água que incide no solo, buscando simular a ação da água proveniente de chuvas (Figura 3). A variação destes dois parâmetros, viabilizada pelo tipo de ensaio, demonstrou de forma prática como isso afeta o tempo de falha e o volume de água necessário para essa ruptura do material, indicando também uma maior influência da incidência de água na deformação do maciço de solo.

Figura 3 – Tempo de falha x intensidade de água x ângulo do talude (A) e umidade volumétrica de falha x intensidade de água x ângulo do talude (B).



Fonte: Chen *et al.* (2020).

O desenvolvimento de estudos dessa natureza em áreas de risco auxilia a estabelecer sistemas de previsão e alarme para esse tipo de evento, reduzindo os efeitos que a falha de um talude pode gerar em regiões com predisposição a escorregamentos induzidos pela incidência de chuvas, tanto no empreendimento em si, quanto nas regiões de entorno que seriam afetadas.

3.1.1 Movimentos de massa

Os fenômenos de movimentos de massa são caracterizados como atividades de origem natural que moldam o relevo, as quais podem ser induzidas ou agravadas pela ação humana em seu entorno. Classificar tais movimentações é o primeiro passo para entender as condições que promovem seu acontecimento, sendo

também fundamental para definir características típicas como profundidade, alcance ou potencial destrutivo. Com isso, há a possibilidade de formular modelos e propor medidas corretivas ou de prevenção.

A classificação que foi considerada como oficial pela *International Association of Engineering Geology and the Environment* (IAEG) foi desenvolvida por Varnes (1978), a qual associa cada tipo de movimentação com o tipo de material (Quadro 1).

Quadro 1 - Classificação simplificada dos movimentos de massa.

Tipos de movimento			Tipos de material		
			Rocha	Solo (granulometria)	
				Predominantemente grosso	Predominantemente fino
Quedas (<i>fall</i>)			Queda de rochas	Queda de detritos	Queda de solo
Tombamento (<i>topple</i>)			Tombamento de rochas	Tombamento de detritos	Tombamento de solo
Escorregamentos (<i>slide</i>)	Rotacional	Poucas unidades	Escorregamento de rochas	Escorregamento de detritos	Escorregamento de solo
	Translacional	Muitas unidades			
Espalhamentos (<i>lateral spread</i>)			Espalhamento de rochas	Espalhamento de detritos	Espalhamento de solo
Corridas (<i>flow</i>)			Corrida de rochas	Corrida de detritos	Corrida de solo
Movimentos complexos (<i>complex</i>)			Combinação de 2 ou mais tipos de movimento		

Fonte: Adaptado de Varnes (1978).

Classificações posteriores viram com o objetivo de agregar características mais específicas a cada tipo de movimento, levando em conta parâmetros de velocidade, direção e recorrência dos movimentos, características do material, geometria, modalidade e deformação do movimento. Isso permitiu atrelar características típicas a estes tipos de movimentos, como determinado por Augusto Filho (1992) que distinguiu tais movimentações da seguinte forma:

- **Rastejo ou fluência:** Contém diversos planos de deslocamento internos e ocorre em velocidades muito baixas (medida em centímetros por ano), que reduzem conforme a

profundidade aumenta. Sua geometria não é definida, podendo apresentar movimentos constantes, sazonais ou intermitentes.

- **Escorregamento:** Apresenta poucos planos de deslocamentos e velocidades que variam entre médias e altas. O movimento pode ter uma superfície de ruptura planar (camada de pequena espessura), circular (formato arredondado) ou em cunha (planos de ruptura bem definidos)
- **Queda:** Movimentações bruscas, sem a existência de planos de deslocamento. Sua movimentação pode ser em queda livre ou em um plano inclinado, a partir do desprendimento de volumes pequenos ou médios de material rochoso.
- **Corrida:** Possui diversas superfícies de deslocamento internas e externas à massa de movimentação. É um movimento rápido que se assemelha a um líquido viscoso, carreando solo, detritos e água. Possui extensos raios de alcance mesmo em áreas planas.

Tendo conhecimento dos pontos a se considerar em um evento de colapso do solo, as interações entre esses fatores também precisam ser conhecidas, visto que um maciço de solo fica exposto a diferentes agentes erosivos que, em conjunto, podem gerar ou acelerar estes fenômenos. Análises de deformação do solo em laboratório se mostram eficientes nesse quesito, permitindo combinar diferentes fatores em um ambiente controlado, como topografia e incidência de chuva, a fim de caracterizar o colapso do maciço de solo por meio da associação entre as fissuras que se formam no material com o movimento de massa que ocorre em seguida (XU *et al.*, 2020).

Além dos efeitos destrutivos do movimento em si, HUANG e DONG (2023) apresentam como um movimento de massa pode deteriorar a resistência de áreas afetadas. Os autores constataram reduções nos parâmetros de coesão e ângulo de atrito nas zonas atingidas, além de verificar que em teores de umidade acima de 20% a taxa de decaimento destes mesmos parâmetros de resistência é maior. Isso torna explícita a necessidade de ferramentas que auxiliam em monitoramentos e tornem tais acontecimentos mais previsíveis.

Modelos capazes de definir a probabilidade de deslizamentos de terra se mostram como uma vertente promissora para conter a imprevisibilidade destes tipos de movimento. Variáveis como propriedades do solo, espessura da camada existente, topografia, propriedades mecânicas e hidráulicas do solo, quando aplicadas em um mesmo modelo, permitem identificar a probabilidade de ocorrência destes fenômenos e auxiliar na tomada de decisão para conter seus efeitos (ALVARADO-FRANCO *et al.*, 2017).

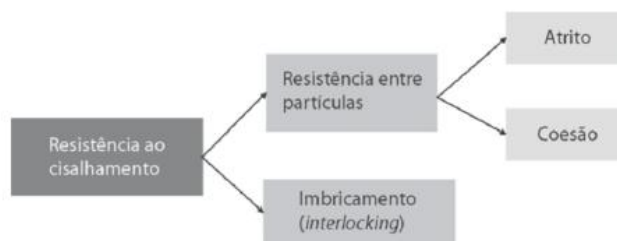
Malka et al. (2023) demonstra que a combinação de análises de suscetibilidade, estudos em campo e modelagens computacionais também é eficaz para compreender os mecanismos que provocam movimentos de massa, ressaltando a importância da interdisciplinaridade nesse tipo de estudo. Dessa maneira, em um contexto de estabilidade de taludes, é interessante que abordagens numéricas e experimentais sejam desenvolvidas em conjunto para reduzir os riscos decorrentes da falha dessas estruturas.

3.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO

Quando se trata de acidentes em obras geotécnicas, os problemas de ruptura em maciços de solo são, majoritariamente, resultados do cisalhamento do material, como em casos de ruptura por carregamento excessivo de uma fundação direta ou em escorregamentos de taludes.

A resistência do solo a esforços cisalhantes (Figura 4) é decorrente da mobilização da resistência gerada entre partículas, imposta pelas interações do arranjo estrutural por meio de deslocamentos relativos entre grãos, e imbricamento que está associado aos diferentes arranjos que constituem o maciço de solo. Em solos saturados, tal resistência entre partículas é decorrente de dois parâmetros denominados ângulo de atrito e coesão, os quais tem origem das interações físicas e químicas entre os elementos que constituem o solo.

Figura 4 – Mecanismos de resistência ao cisalhamento do solo.



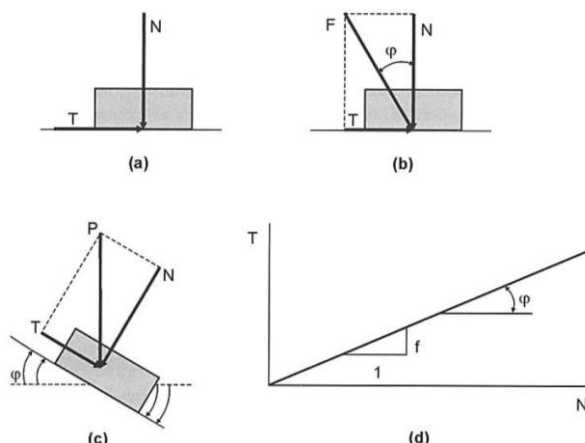
Fonte: Gerscovich (2016).

No entanto, quando se considera um estado não saturado para este material, há a influência de um terceiro fator proveniente da tensão gerada nos poros contidos no solo, denominada sucção matricial. Essa tensão é resultado da interação entre a água presente nos vazios do material e seus grãos, o que produz uma força negativa entre eles e altera o comportamento do maciço.

3.2.1 Resistência em solos saturados

O ângulo de atrito de um solo pode ser entendido como uma propriedade análoga ao típico problema de deslizamento de um corpo sobre uma superfície horizontal (Figura 5). Este problema demonstra que quando uma força vertical é aplicada sobre um corpo, a força horizontal necessária para movê-lo deve ser superior à força normal multiplicada pelo coeficiente de atrito entre os materiais que compõem o solo. Isso exhibe uma relação entre as forças, permitindo concluir que estas podem ser descritas como o resultado da decomposição de uma força F com uma inclinação ϕ (Sousa Pinto, 2006).

Figura 5 – Esquema demonstrativo de atrito entre dois corpos.

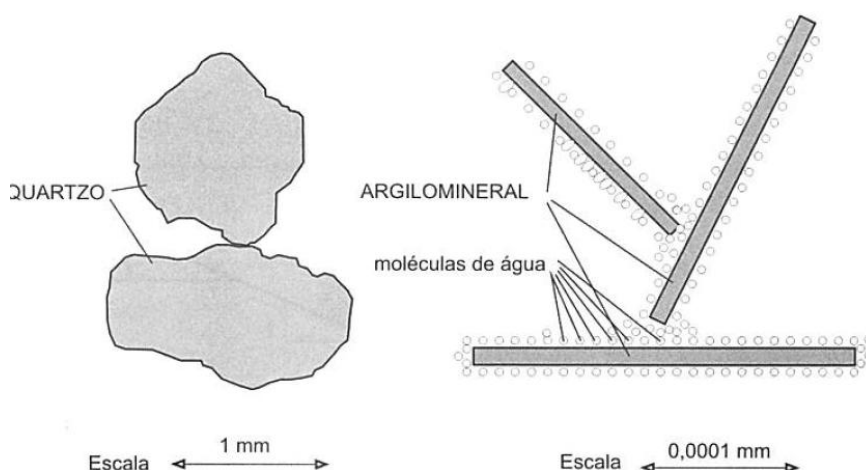


Fonte: Sousa Pinto (2006).

No entanto, o solo se distingue da situação apresentada no problema por envolver inúmeros grãos nesta transmissão de forças, podendo ocorrer os processos de deslizamento ou rolamento entre eles conforme o formato que possuem e o arranjo que constituem.

Além disso, moléculas de água podem assumir um papel fundamental nessa interação a depender da granulometria do material (Figura 6). Em solos arenosos, o número de grãos envolvidos na transmissão de uma força aplicada é menor, gerando uma maior força de contato que é capaz de expulsar a água entre tais grãos. Já em solos argilosos, a quantidade de grãos envolvidos aumenta e gera uma maior superfície de contato, impondo uma menor força entre os grãos que é incapaz de expulsar a água que está adsorvida ao grão, tornando-a o agente transmissor dessas forças.

Figura 6 – Esquema da ação da água no atrito do solo.



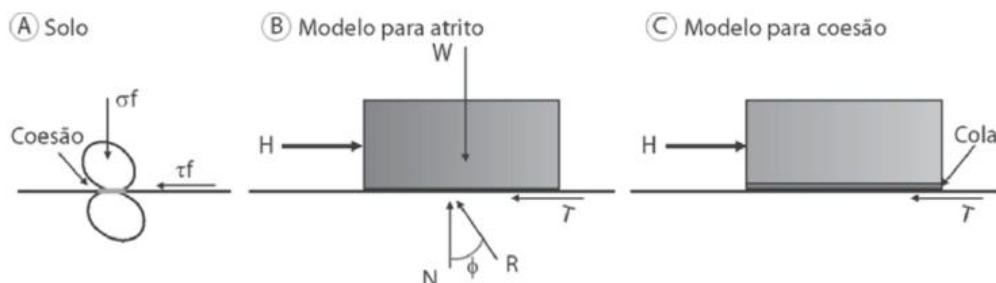
Fonte: Pinto (2006).

Nesse viés, o ângulo de atrito pode ser definido como o ângulo máximo que uma força aplicada por um corpo pode fazer com a normal ao plano de contato sem que ocorra movimentações suficientes entre os grãos para gerar o rompimento do material.

Relativo à coesão, há alguns fenômenos que a diferenciam do ângulo de atrito (Figura 7). Este parâmetro de resistência é associado às forças de interação entre os grãos que constituem o solo, provenientes de ligações físico-químicas e independe da tensão normal aplicada ao arranjo estrutural. Por conta disso, forma-se

uma espécie de “cola” entre partículas que resiste ao esforço de cisalhamento aplicado (GERSCOVICH, 2016).

Figura 7 – Analogia física de resistência do solo.



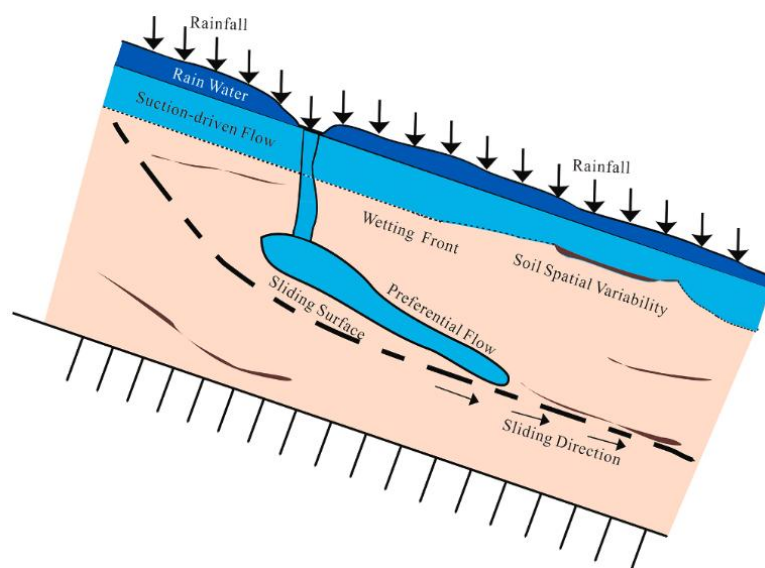
Fonte: Budhu (2000).

Nesse sentido, como ambos os parâmetros são influenciados por inúmeras condições externas ao material, dentro da estabilidade de taludes entende-se que há uma necessidade de compreender como essa variabilidade espacial deste material pode influenciar na segurança de um talude.

Para investigar essa variabilidade dos parâmetros de resistência do solo em análises de superfície crítica de um talude, Bai; Hu; Gu, (2019) verificaram fenômenos que demonstram influência dessa variável na superfície crítica formada, devido a existência de possíveis zonas com maiores parâmetros de resistência ao cisalhamento que geraram desvios nestas superfícies de ruptura. Por conta disso, em seu método foi necessário contornar tal situação, pois em um talude de solo homogêneo essa zona não deve ocorrer.

Ma et al. (2024) destaca que a variabilidade espacial do solo é importante em um contexto de análise de segurança em escorregamentos ocasionados por incidência de chuvas, visto que a simplificação desta condição pode gerar um fator de segurança sobrestimado. Por conta da variabilidade espacial do solo, zonas preferencias de infiltração (Figura 8) podem se formar e causar essa redução do fator de segurança do talude, pois acelera o amolecimento do solo na superfície de escorregamento.

Figura 8 – Formação de zonas de infiltração preferencias no solo.



Fonte: Ma *et al.* (2024).

3.2.2 Resistência em solos não saturados

O solo em seu estado saturado é considerado como um material com uma estrutura bifásica, composta por sólidos e água. Na consideração da não saturação, o ar contido nos poros do maciço é somado a sua estrutura, formando uma interface água-ar em seus vazios e compondo uma estrutura trifásica neste material. Por conta disso, o solo nesta condição apresenta pressões neutras negativas que atuam na interação entre os sólidos, as quais podem variar em campo conforme o tipo de fluxo superficial decorrente da sua exposição aos fatores climáticos (Figura 9).

Com um fluxo ascendente (evapotranspiração), o solo tende a reduzir sua umidade e isso gera um aumento na sucção matricial, saindo da condição de redução linear das pressões no estado de equilíbrio com o nível d'água. Já para um solo exposto a precipitações, tal sucção tende a reduzir devido ao aumento da umidade do material (VILAR, 2018).

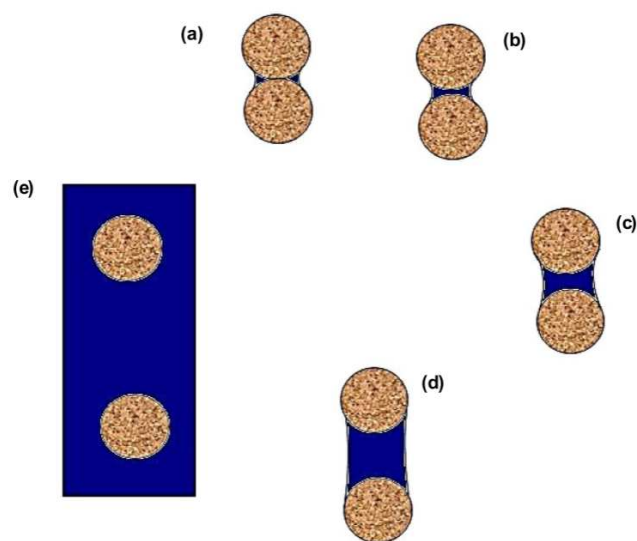
Figura 9 – Perfil de solo não saturado e pressões na água intersticial.



Fonte: Vilar (2018).

Quando se analisa a resistência ao cisalhamento do solo em uma condição não saturada, essa sucção matricial deve ser mensurada. Por estar intrinsicamente relacionado à umidade do solo, a Figura 10 demonstra como o aumento na quantidade de água reduz essa interação decorrente da sucção matricial entre os sólidos, o que reduz a coesão aparente do material e, conseqüentemente, aumenta a dispersão dos grãos que constituem o maciço de solo. Essa relação entre o teor de umidade volumétrico do solo (ou também grau de saturação) e a sucção matricial é descrita pela curva característica solo-água.

Figura 10 – Esquema da separação das partículas com o aumento da umidade do solo.

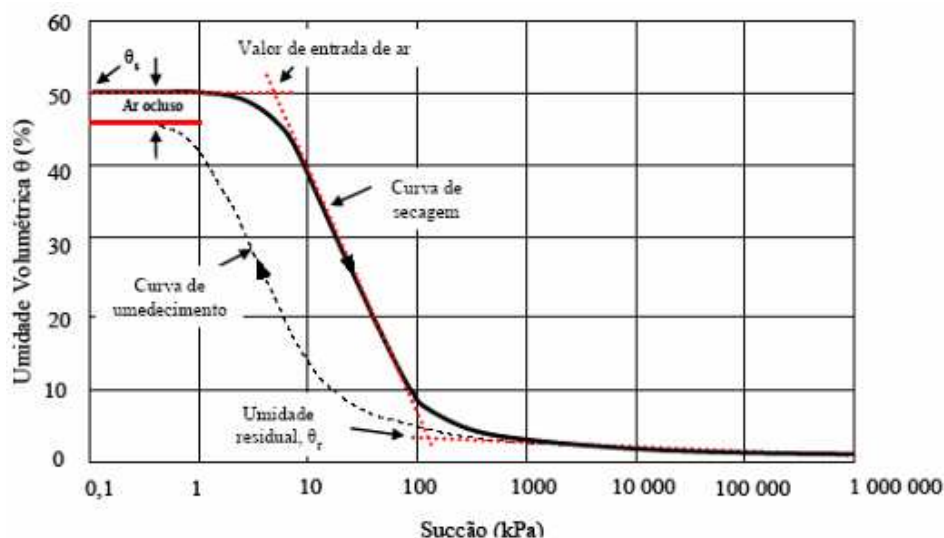


Fonte: Pandya e Sachan (2020).

Compreender a curva característica solo-água (CCSA) de um solo é fundamental para aplicação da mecânica dos solos não saturados dentro da geotecnia. Diversos métodos para obtenção dessa curva podem ser aplicados, seja de modo indireto, estimando a curva pela distribuição granulométrica do solo, ou direto, com a coleta direta de dados de sucção. Além disso, novas técnicas de monitoramento de campo e medições em laboratório permitem monitorar o comportamento deste material no estado não saturado e comprovar a teoria, cabendo então aos profissionais da área aplicar este conhecimento na prática (FREDLUND, 2006).

Embora a CCSA apresente formatos diferentes para cada solo, pontos de interesse demonstrados na Figura 11 são comuns a todas elas, como o valor de entrada de ar (VEA), que corresponde ao valor de sucção em que se inicia o processo de saída da água contida nos poros do solo, e a umidade residual que indica o valor de umidade em que há uma estagnação desse processo de saída do fluido.

Figura 11 – Curva característica solo-água típica.



Fonte: Adaptado de Jesus (2008).

Devido ao seu papel fundamental na compreensão do comportamento do solo não saturado, modelos matemáticos para ajuste dessa curva foram desenvolvidos por diversos autores, permitindo representar valores experimentais por meio de equações matemáticas. Leong e Rahardjo (1997) e Gerscovich (2001) compilaram alguns desses modelos para curvas unimodais (somente um VEA) e eles estão colocados no Quadro 2.

Quadro 2 – Equações de ajuste de curvas características solo-água unimodais.

Referência	Equação	Parâmetros de ajuste
Gardner (1958)	$\theta = \frac{1}{1 + (q * \psi)^n}$	q; n
Brooks e Corey (1964)	$\theta = \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda$	λ
Viesser (1966)	$\psi = \frac{a * (\theta_s - \theta)^b}{\theta^c}$	a; b; c
Van Genuchten (1980)	$\theta = \theta_r + (-\theta_r) * \left(\frac{1}{1 + (\alpha * \psi)^n} \right)^m$	α ; m; n
Fredlund e Xing (1994)	$\theta = \theta_r * \theta_s + (\theta_s - \theta_r) * \theta_s * \left(\frac{1}{\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]} \right)^m$	α ; m; n

Fonte: Adaptado de Leong e Rahardjo (1997)

No entanto, em solos que a CCSA possui um caráter bimodal (dois valores de entrada de ar característicos) estes modelos podem não apresentar ajustes adequados. Para atender a essa necessidade, Gitirana Jr. e Fredlund (2004) propuseram um modelo baseado na equação geral da hipérbole que resultou na Equação 1 para ajustes de curas bimodais.

$$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + \left(\frac{\psi}{\sqrt{\psi_{b1} \cdot \psi_{res1}}} \right)^{d1}} + \frac{S_2 - S_3}{1 + \left(\frac{\psi}{\sqrt{\psi_{res1} \cdot \psi_{b1}}} \right)^{d2}} + \frac{S_3 - S_4}{1 + \left(\frac{\psi}{\sqrt{\psi_{b2} \cdot \psi_{res2}}} \right)^{d3}} + S_4 \quad \text{Eq. 1}$$

Constantemente estudos considerando essa condição do solo vem sendo desenvolvidos, pois há benefícios positivos que a sucção poderia agregar em análises de resistência ao cisalhamento do solo que podem otimizar as obras de engenharia. Contudo, o comportamento desse material frente a aumentos de saturação precisa ser constantemente monitorado.

Como observado na Tabela 1, em estudos que analisam a resistência ao cisalhamento em solos não saturados, nota-se um ganho de resistência no material por meio da coesão efetiva do solo conforme a sucção matricial (Ψ) aumenta. No entanto, sua alta variabilidade dificulta sua aplicação em casos práticos, pois a análise para dimensionamento e monitoramento se torna mais complexa. Somado a isso, é perceptível uma baixa influência dessa mesma variação da sucção no ângulo de atrito do solo (ABHINAV; BASER, 2023; CHEN, P. *et al.*, 2013; FURMAN; FARO, 2019; LI *et al.*, 2017).

Tabela 1 – Parâmetros de resistência para diferentes sucções matriciais.

S (%)	σ (kPa)	τ (kPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)	Ψ (kPa)
95	200	144,5	1,1	35,8	0
	100	75,5			
	50	35,6			
65	200	151,6	8,2	35,9	8
	100	85,4			
	50	41,3			

Continua

(Conclusão)

S (%)	σ (kPa)	τ (kPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)	Ψ (kPa)
50	200	159,4	13,2	36,5	15
	100	93,3			700
	50	46,3			
35	200	179,4	39,2	38,5	700
	100	120,3			
	50	61,3			
1	200	218,5	81,9	34,7	>10000
	100	157,3			
	50	112,5			

Fonte: Furman e Faro (2019).

Estas correlações verificadas entre aumento de umidade e redução de coesão do solo permitem agregar tal fator em outros tipos de estudo. No âmbito de gerenciamento de riscos na estabilidade de taludes, correlações entre registros pluviométricos e movimentos de massa são amplamente estudadas a fim de auxiliar na previsão destes eventos. Salah et al. (2019) identifica similaridades entre gráficos de precipitação cumulativa da região e escorregamentos de terra registrados, evidenciando a convergência entre a data dos escorregamentos com os eventos de alta pluviosidade em curtos períodos.

Cheng et al. (2024) propõe uma metodologia de análise determinística de estabilidade de taludes capaz de prever a influência da infiltração de precipitações no fator de segurança de um talude, contribuindo para análises mais precisas da segurança e permitindo considerar a não saturação do solo em uma análise de estabilidade de um talude. Os resultados demonstraram reduções de cerca de 40% no fator de segurança nos taludes estudados, levando em conta chuvas de diferentes intensidades. O autor ainda compara seus resultados com métodos tradicionais de cálculo de estabilidade, como Morgenstern-Price, Jambu e Bishop, a fim de verificar a proximidade entre os resultados. Isso ressalta a importância de estudos comparativos nesse âmbito da geotecnia.

3.3 SEGURANÇA EM ESTABILIDADE DE TALUDES

A estabilidade de taludes tem como objetivo garantir a segurança e correto funcionamento de obras geotécnicas em que o solo é o principal material resistente. No Brasil, a ABNT NBR 11682:2009 é a norma principal para tais obras de engenharia, contendo os pontos relevantes para as etapas deste tipo de obra, como procedimentos preliminares, investigação geotécnica, projeto, execução, manutenção e monitoramento.

Dessa maneira, essa norma define fatores de segurança mínimos que tais obras precisam conter para garantir sua estabilidade, tomando como critério índices de periculosidade em termos de perda de vidas humanas (Quadro 3) e danos materiais e ambientais (Quadro 4).

Quadro 3- Nível de segurança contra a perda de vidas humanas

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

Fonte: ABNT NBR 11682 (2009).

Quadro 4 - Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais

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

Fonte: ABNT NBR 11682 (2009).

Com estes níveis de segurança estabelecidos, cabe ao engenheiro civil geotécnico definir os níveis aplicáveis ao empreendimento que está sendo projetado, sempre em acordo com o contratante e órgãos públicos competentes (ABNT, 2009). Com isso, o fator de segurança mínimo é estabelecido (Quadro 4) para que a obra seja considerada segura para execução.

Quadro 5 – Fator de segurança mínimo para deslizamentos.

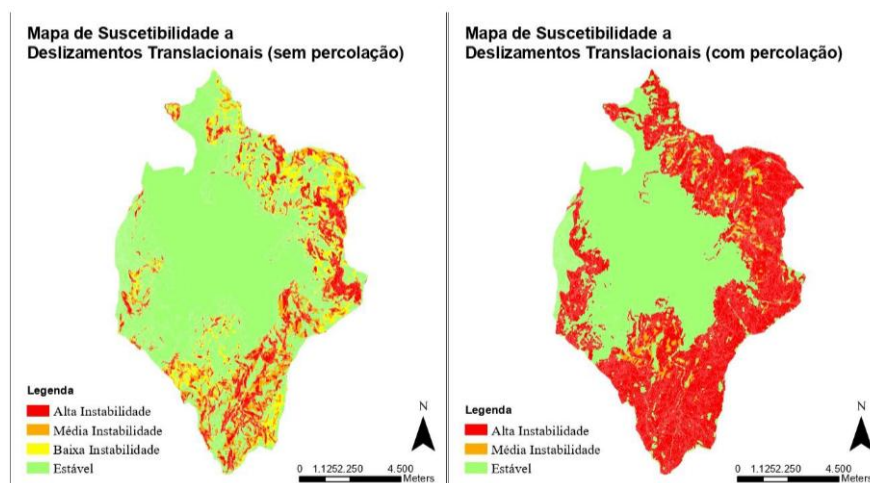
Nível de segurança contra danos ambientais e materiais	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Fonte: ABNT NBR 11682 (2009).

HULLER et al. (2022) faz uso desses limites normativos para o fator de segurança com o intuito de desenvolver mapas de suscetibilidade de

deslizamentos em uma região de estudo (Figura 122), auxiliando na previsibilidade de futuros deslizamentos e facilitando a contenção de possíveis danos. Além disso, a partir de análises comparativas de hipóteses com e sem percolação, destaca-se mais uma vez a influência que a água possui nesse tipo de cálculo.

Figura 12 – Mapas de suscetibilidade de deslizamentos.



Fonte: Huller *et al.* (2022).

Sob outra perspectiva, essa forma de apresentação de níveis de periculosidade em norma também auxilia na tomada de decisão. Araujo *et al* (2022) analisou o fator de segurança de taludes que demonstraram variações entre 1,24 e 0,89. Tendo definido tais valores, foram estabelecidos os níveis de periculosidade a serem atendidos e, com base no fator de segurança mínimo fixado, foi deliberada a desocupação de zonas ocupadas para garantir a segurança da população, além de determinar intervenções nestes taludes para garantir seu correto funcionamento.

3.4 MÉTODOS DE ESTABILIDADE DE TALUDES

No contexto da estabilidade de taludes, uma análise pode ser realizada em termos de fator de segurança ou probabilidade de falha, que correspondem a métodos determinísticos e probabilísticos, respectivamente. No Brasil, devido a NBR 11682 (2009) estabelecer apenas limites para análises determinísticas, tal metodologia possui maior aplicabilidade.

Contudo, para sistemas de defesa contra enchentes a forma de avaliação dos métodos determinísticos, em que a capacidade do sistema é comparada com a demanda de esforços que ele possui, pode resultar em fatores de segurança enganosos devido às incertezas embutidas nestas duas variáveis. Por conta disso, duas estruturas com o mesmo fator de segurança podem apresentar probabilidades de falha diferentes (HAMEDIFAR *et al.*, 2014).

Ainda assim, devido a gama de métodos possíveis dentro da metodologia de análise determinística, estudos comparativos seguindo este viés ainda são constantemente realizados, como Fredlund e Krahn (1976), Rabie (2014) e Dyson e Tolooiyan (2020), o que facilita sua aplicação no meio profissional e torna os resultados mais seguros ao evidenciar o método mais eficiente.

3.4.1 Estabilidade por equilíbrio limite

A metodologia de equilíbrio limite para análise de estabilidade engloba algumas alternativas para o este cálculo, dentre elas, está o método das fatias. Nela, uma superfície de deslizamento é definida de forma arbitrária com uma forma circular ou não, permitindo calcular o equilíbrio de forças atuantes no solo se baseando nas equações da estática (Equação 2, Equação 3 e Equação 4) colocadas a seguir (SILVA, 2011).

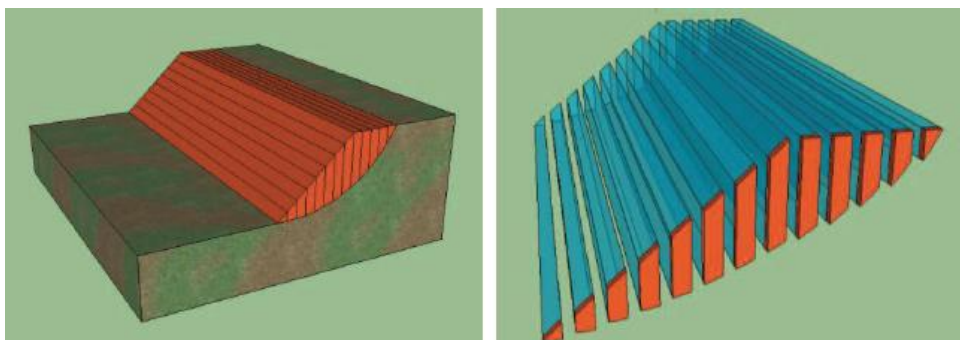
$$\sum F_v = 0 \quad \text{Eq. 2}$$

$$\sum F_h = 0 \quad \text{Eq. 3}$$

$$\sum M_o = 0 \quad \text{Eq. 4}$$

Tal cálculo é possível devido ao princípio do método das fatias, no qual deve-se seccionar a geometria do maciço de solo que se encontra acima da superfície de deslizamento em fatias de faces verticais (Figura 133). Diversos autores como Jambu (1954), Bishop (1955), Morgenstern e Price (1965) e Spencer (1967) propuseram seus métodos com diferentes considerações. A quantidade de fatias determinadas implica em um maior refinamento dos resultados por ter uma melhor discretização das forças, no entanto, torna o processo mais trabalhoso e demorado e, por conta disso, a aplicação do método de forma computacional é benéfica à análise.

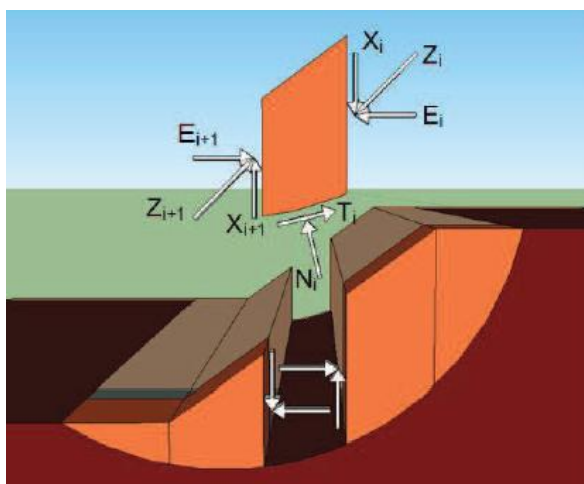
Figura 13 -Representação da divisão de um talude qualquer em fatias



Fonte: Silva (2011).

Em cada fatia, há um levantamento de forças atuantes (Figura 144) para serem consideradas em cada método de análise, sendo X_i e E_i forças de interação entre fatias e N_i e T_i as reações com a superfície deslizante. Devido a maior quantidade de variáveis não conhecidas quando comparada ao número de equações de equilíbrio disponíveis, diferentes autores desenvolvem seus métodos assumindo algumas condições que reduzem a quantidade de forças atuantes em cada fatia (DUNCAN; WRIGHT, 1980).

Figura 14 – Forças atuantes em uma fatia.



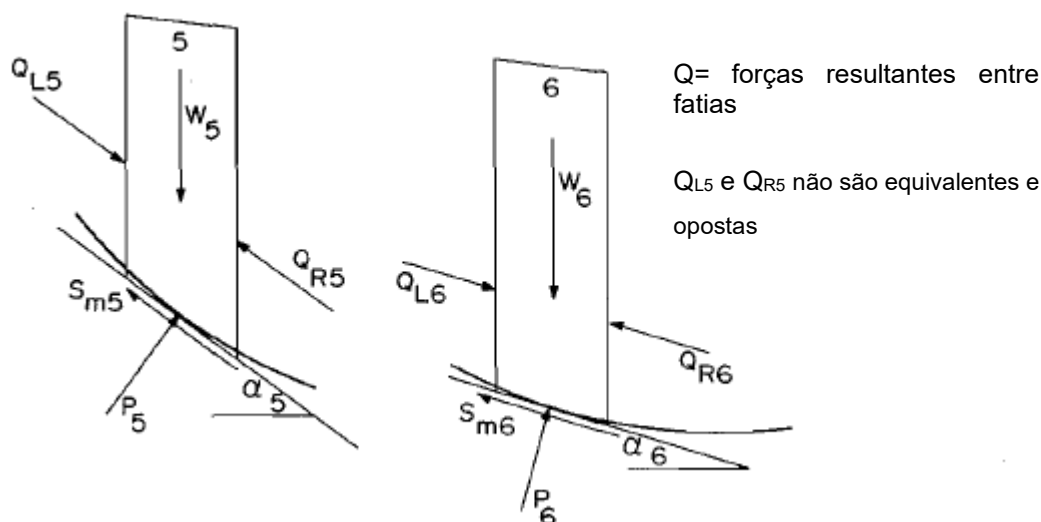
Fonte: Silva (2011).

3.4.2 Método de Fellenius

Fredlund e Krahn (1976) colocam este método como o mais simples, sendo o único que resulta em uma equação linear para o fator de segurança. Nas

considerações de forças atuantes nas fatias (Figura 155), o método presume que forças de interação entre as fatias são paralelas a sua base, permitindo desconsiderá-las nos cálculos por serem equivalentes e estarem em sentidos opostos. Dessa maneira, o equilíbrio de forças é simplificado apenas ao peso da fatia e a tensão que esta gera na base, com o fator de segurança do conjunto derivando da equação de equilíbrio de momentos.

Figura 15 – Forças atuantes nas fatias segundo o método de Fellenius.

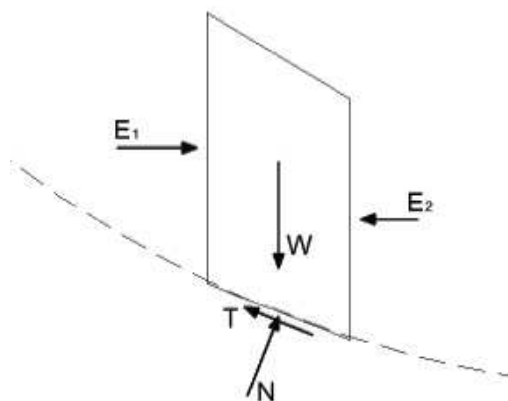


Fonte: Adaptado de Fredlund e Krahn (1976).

3.4.3 Método de Bishop simplificado

O método proposto por Bishop é uma modificação do método descrito anteriormente. Nele, as forças de interação entre fatias passam a ser consideradas, admitindo uma inclinação normal à face da fatia e ainda desconsiderando forças cisalhantes na face (Figura 166). Para o fator de segurança (FS), a equação de equilíbrio de momentos ainda é a fundamentação do método, mas resultados de FS já reduzem sua superestimação na ordem de 15% quando comparado com Fellenius (ROGÉRIO, 1977).

Figura 16 – Forças atuantes nas fatias segundo o método de Bishop.

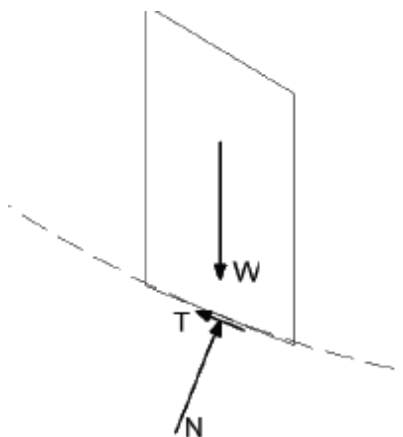


Fonte: Adaptado de Silva (2011).

3.4.4 Método de Jambu simplificado

Este método desconsidera as interações entre fatias (Figura 17), satisfazendo equilíbrio de forças. No entanto, para que essa simplificação seja possível, é introduzido um fator de correção para o fator de segurança resultante deste método (FREDLUND, D. G.; KRAHN, 1976).

Figura 17 – Forças atuantes nas fatias segundo o método de Jambu simplificado.



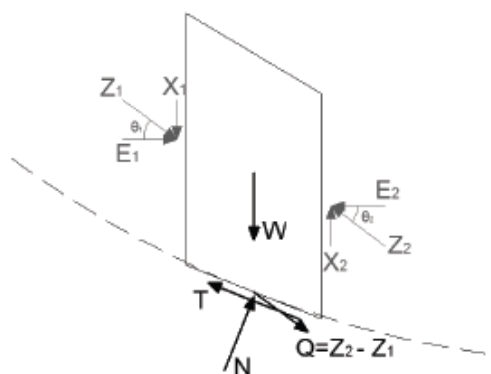
Fonte: Adaptado de Silva (2011).

3.4.5 Método de Spencer

O método desenvolvido por Spencer (1967) propõe uma abordagem mais rigorosa para a estabilidade de um talude, visto que tal autor satisfaz todas as equações de equilíbrio e ainda considera as forças de interação entre fatias, como visto na Figura 18. O autor considera uma proporcionalidade entre as forças verticais

e horizontais provenientes das interações entre lamelas, as quais resultam em uma força Z com inclinação constante Θ . A força resultante da diferença entre tais componentes (representada por Q) atua no centro da base da respectiva fatia, juntamente com a força normal N e de corte T .

Figura 18 – Forças atuantes nas fatias segundo o método de Spencer.



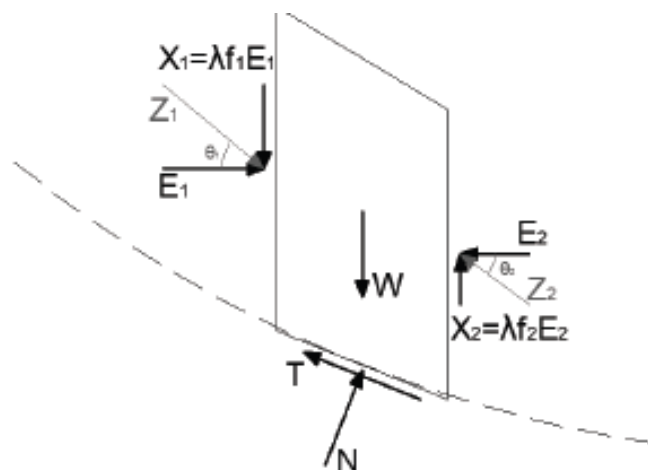
Fonte: Silva (2011).

3.4.6 Método de Morgenstern-Price

Este método proposto por Morgenstern e Price (1965) também se trata de um método rigoroso, atendendo a todas as equações de equilíbrio. Mattos (2010) alega que tal método, por conta dessa rigorosidade, permite a determinação de um fator de segurança para qualquer tipo de superfície de ruptura, visto que casos em que a superfície de ruptura foge do padrão circular, o fator de segurança estimado para tal talude pode não ser o mais crítico.

Além das forças de peso próprio (W), atrito (T) e a reação normal na base da fatia (N), como apresentado na Figura 19, agora as forças de interação entre lamelas consideradas para cálculo da estabilidade do talude são governadas por uma função $f(x)$, a qual é multiplicada por um fator λ e este, por sua vez, deve ser especificado previamente ou definido a partir de um processo iterativo até que se atenda as condições de contorno (SILVA, 2011).

Figura 19 – Forças atuantes nas fatias segundo o método de Morgenstern-Price.



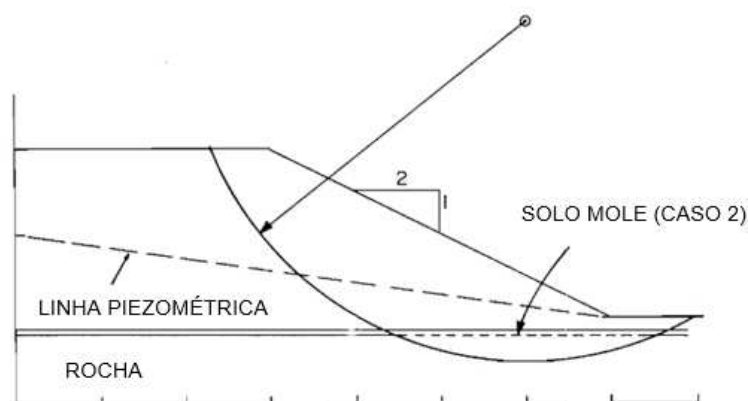
Fonte: Adaptado de Silva (2011).

Como visto, os diferentes métodos assumem condições de equilíbrio diferentes para atender a uma mesma finalidade que é determinar o fator de segurança de um talude. Por conta disso, comparações são necessárias para entender quais são os efeitos que isso gera no fator de segurança calculado.

Duncan e Wright (1980) observaram que métodos que não satisfazem todas as condições de equilíbrio, podem resultar em fatores de segurança equivocados em condições específicas. O método de Fellenius resultou em fatores de segurança 50% abaixo do real para análises em termos de tensão efetiva com altos valores de pressão neutra. Em contraponto, quando o método satisfaz todas as condições de equilíbrio (método de Jambu, Spencer e Morgenstern-Price), as variações do fator de segurança calculado não ultrapassam 5% quando comparado ao real. No entanto, tal variabilidade também foi observada no método de Bishop modificado.

Fredlund e Krahn (1976) também realizaram um comparativo de diferentes métodos aplicados em um mesmo talude (Figura 20 e Tabela 2). Nos resultados calculados, observa-se similaridades entre os métodos de Spencer, Morgenstern-Price e Bishop simplificado corroborando com o autor anterior.

Figura 20 – Talude de estudo analisado por Fredlund e Krahn (1976).



Fonte: Adaptado de Fredlund e Krahn (1976).

Tabela 2 – Fatores de segurança calculados por Fredlund e Krahn (1976).

Condição do talude	Método de cálculo do fator de segurança				
	Fellenius	Bishop simplificado	Jambu simplificado	Spencer	Morgenstern-Price
CASO 1: Talude 2:1 com 12m de altura $\phi'=20^\circ$ e $c'=20$ kPa	1,928	2,080	2,041	2,073	2,076
CASO 2: Talude do caso 1, mas com uma camada fina de solo mole ($\phi'=10^\circ$ e $c'=0$)	1,288	1,377	1,448	1,373	1,378
Talude do caso 1, mas com uma linha piezométrica	1,693	1,834	1,827	1,830	1,833
Talude do caso 2, mas com uma linha piezométrica	1,171	1,248	1,333	1,245	1,250

Fonte: Adaptado de *Fredlund e Krahn* (1976).

Em barragens de solo, estudos comparativos destes métodos em condições de construção e operação da estrutura também indicam uma convergência entre os métodos de Spencer, Morgenstern-Price e Bishop simplificado para os valores de fator de segurança, no entanto cabe ao profissional responsável julgar qual método se encaixa melhor ao seu contexto de análise (ANTUNES *et al.*, 2018; NETO; FREITAS, 2020).

Tendo em vista o que foi apresentado, é importante ressaltar a necessidade de estudos comparativos dentro da estabilidade de taludes, visto que há

uma gama de métodos de análise para uma mesma situação. No âmbito da retroanálise de taludes a situação se repete, e é nesse contexto que essa pesquisa busca se inserir trazendo um comparativo de diferentes metodologias aplicadas a um mesmo talude.

3.5 ESTUDOS COM RETROANÁLISE

A retroanálise de taludes se mostra como uma ferramenta eficaz para investigação de fatores que levam tal tipo de estrutura ao colapso, fornecendo resultados comprobatórios para possíveis hipóteses de ruptura. Além disso, esse tipo de análise pode tornar estes eventos mais previsíveis, pois permite analisar possíveis cenários de ruptura para um talude ainda estável.

Embora haja uma popularidade da retroanálise devido às limitações de ensaios, sejam de campo ou de laboratório, autores também demonstram diversos fatores que influenciam nos parâmetros de resistência obtidos por retroanálise, podendo prejudicar os resultados. Imprecisões quanto a posição da superfície de ruptura e eventuais trincas de tração geram parâmetros de resistência mais conservadores, com destaque para solos coesivos. Além disso, outros pontos que podem acabar sendo negligenciados como distribuição da pressão neutra no momento da ruptura e a consideração de uma ruptura progressiva, que afetam as tensões existentes no solo, também podem acarretar resultados equivocados (JESUS, 2008).

Duas vertentes compõem as formas de se realizar uma retroanálise, as quais se diferem nas considerações para um modelo de retroanálise. A primeira vertente é a análise determinística, em que o modelo é admitido como preciso e a retroanálise tem como objetivo definir os parâmetros de resistência, desconsiderando a variabilidade dessas características do solo. A forma de se realizar essa abordagem ainda apresenta variações, podendo ser uma análise inversa para taludes que já romperam ou uma análise direta, buscando determinar as condições de resistência que levariam a ruptura (CIVIDINI *et al.*, 1980).

Sob um outro viés, em retroanálises probabilísticas o modelo de estabilidade já não é perfeitamente preciso, agregando aos resultados as incertezas e variabilidades dos parâmetros de resistência e, conseqüentemente, assumindo que inúmeras combinações destes parâmetros podem levar o talude a ruptura. Além disso,

a abordagem probabilística permite análises simultâneas de diferentes parâmetros, impondo uma aleatoriedade aos parâmetros mais incertos e os aprimorando com informações obtidas pela ruptura do talude. (ZHANG et al., 2010; GARCIA-FERIA; COLMENARES, 2019; ZHANG et al., 2010),

Retroanálises probabilísticas de escorregamentos podem ser usadas também como fonte de dados para desenvolvimento de ferramentas de previsão. Sun *et al* (2021) propõe um método que incorpora dados obtidos de retroanálises para previsão e classificação de zonas de perigo em futuros escorregamentos. O método, além de prever o trajeto do possível deslizamento, também permite desenvolver uma curva de probabilidade de extrapolação da massa escorregada em pontos ao longo do trajeto previsto. Essa informação pode guiar diretamente o gerenciamento de riscos para esses eventos em zonas suscetíveis e viabilizar manobras para prevenção ou diminuição dos danos de um possível movimento de massa.

Para ruptura de encostas induzidas por precipitações, a retroanálise auxilia a estabelecer uma possível relação entre o desempenho do maciço de solo e a precipitação acumulada. Isso permite um monitoramento mais eficaz de taludes ainda estáveis para prever eventos de ruptura futuros. Existem inúmeros indicadores para quantificar a redução da eficiência de um talude deste tipo em campo por meio de sensores, como deslocamento e inclinação superficial, deslocamentos internos, nível do lençol freático ou poropressão. No entanto, algumas encostas apresentam desafios para esse tipo de monitoramento devido a sua localização, dimensão, custo de manutenção do sistema ou até mesmo o tempo para atendimento em situações emergenciais (WANG *et al.*, 2023).

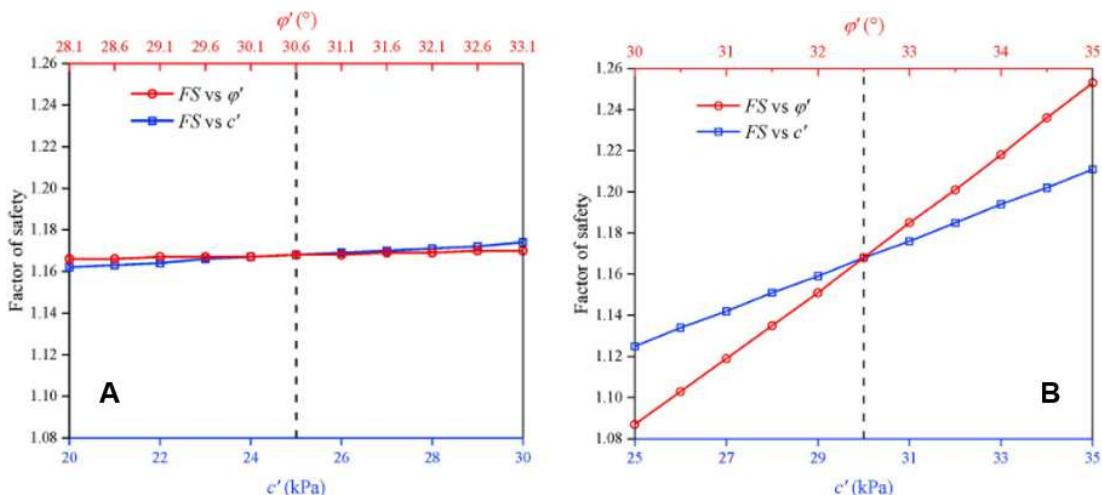
Em um estudo de caso pós ruptura de um talude com aproximadamente 15 metros de altura formado por solo coluvionar de natureza laterítica, Calle (2000) definiu que a ruptura estava relacionada com a redução da sucção presente no talude, devido ao alto volume de chuvas que provocou uma maior infiltração de água no talude. Tal conclusão foi obtida por meio de retroanálises na condição não saturada do talude, demonstrando a relevância que as variações da sucção em um talude de solo laterizado pode assumir nesse tipo de colapso.

Neste sentido, Liu, Wang e Leung (2023) trabalham tal relação a partir da hipótese de que registros de precipitações que um talude resiste, antes de sua ruptura, podem ser úteis para reduzir as incertezas nos parâmetros do solo em retroanálises probabilísticas. A metodologia engloba retroanálises probabilísticas e

registros pluviométricos ocorridos no talude antes de sua ruptura. Aplicado a um caso histórico de Singapura, tal metodologia demonstrou reduções consideráveis no intervalo de valores possíveis para c e ϕ para que houvesse a ruptura, o que é fundamental para quantificar o risco de escorregamentos.

Ainda no intuito de aprimorar retroanálises, Jiang et al. (2024) agrega à base de informações outras fontes como dados de monitoramento, localização da superfície crítica e registros anteriores de permanência do talude a precipitações. Tal metodologia se mostrou eficaz para reduzir incertezas nos parâmetros de resistência do solo. Além disso, análises de sensibilidade de tais parâmetros podem ser realizadas para verificar como se comportam em função do fator de segurança do talude, conforme visto na Figura 21.

Figura 21 – Sensitividade dos parâmetros de resistência da camada de preenchimento (A) e do solo coluvionar (B) que compõem a seção do talude.



Fonte: Jiang et al. (2024).

Dessa forma, Jiang et al. (2024) demonstra a maior suscetibilidade a variações no fator de segurança quando há oscilações dos parâmetros de resistência do solo B, além de evidenciar como o ângulo de atrito tem uma maior influência nesse aspecto se comparado à coesão. Estudos deste tipo, para avaliações iniciais da influência de uma camada de solo no fator de segurança, podem ser uma ferramenta eficiente para uma posterior retroanálise em taludes com perfil estratigráfico mais heterogêneo.

Ao retroanalisar casos históricos ocorridos em Salvador (BA), Jesus (2008) constatou maiores variações para a coesão do solo, atrelando esse fator com

o mecanismo de ruptura dos casos estudados. Segundo o autor, a perda de sucção devido à infiltração de água no solo gera essa variação acentuada da coesão aparente, o que se mostrou ser um mecanismo de ruptura comum na cidade devido à grande similaridade entre as características dos escorregamentos estudados.

Estudos dessa natureza evidenciam a complexidade de se trabalhar com análises de estabilidade envolvendo solos tropicais, tendo em vista o processo de laterização e sua estrutura com maior índice de vazios, o que o torna mais suscetível a variações de resistência devido a reduções na sucção matricial. Tal fator também destaca a pertinência de se considerar o comportamento não saturado do solo em retroanálises para esse tipo de solo.

Sob outro viés, Mattos (2010) observa, por meio de retroanálises em um talude rodoviário pós-ruptura, que existia incoerências entre resultados de laboratório e suas análises, pois para um fator de segurança unitário ($FS=1$) os parâmetros de solo precisariam ser muito menores que os obtidos em laboratório. Logo, isso o leva a concluir que o ensaio de cisalhamento direto realizado pode não ser a opção mais representativa em termos de estabilidade de taludes para solos com intensa anisotropia e planos de fraqueza em sua geometria.

Relativo à metodologia de análise, diversos autores propuseram formas de realizar uma retroanálise em um talude, cada uma focando em condições específicas e trazendo caminhos diferentes para se efetuar uma retroanálise. Dessa maneira, o Quadro 6 apresenta algumas metodologias e o tipo de aplicação que estas permitem.

Quadro 6 - Metodologias de retroanálise existentes na literatura.

METODOLOGIA	PROPOSTA	APLICABILIDADE
Gomes (2003)	Método que exclui a necessidade de grande volume de cálculos repetitivos para obtenção dos parâmetros de resistência	Desenvolvido com foco de aplicação para rupturas com superfície circular, mas diz ser aplicável para outros tipos de ruptura
Hoek (1965)	Desenvolve equações adimensionais que permitem a confecção de ábacos para definição do fator de segurança do talude	Considera ruptura planar ou circular/rotacional

(Continua)

(Conclusão)

METODOLOGIA	PROPOSTA	APLICABILIDADE
Lopes (1981)	Método que dispensa ensaios laboratoriais, baseados na observação de rupturas em encostas naturais ou taludes artificiais	Aplicável a taludes escavados, com pouca heterogeneidade da seção do talude. É dependente do acesso ao local e levantamentos in loco para avaliação das cicatrizes de ruptura
Lin e Chen (2017)	Utilizam o ângulo de inclinação do talude como uma nova maneira de se obter um valor de ângulo de atrito para $FS=1$	Taludes homogêneos e com valores de peso específico do solo, ângulo de inclinação e localização da superfície real de ruptura conhecidos
Oliveira (2024)	Metodologia desenvolvida por programação, reduzindo o tempo de execução da retroanálise	Possibilita a análise de taludes de solo homogêneo ou heterogêneo, com saturação variável, superfícies de ruptura circulares ou não circulares e análises 2D e 3D

Fonte: Compilação do autor.

Ao propor sua metodologia, Gomes (2003) desenvolveu algumas retroanálises de rupturas ocorridas na cidade de São Paulo e Paraná, alcançando um desempenho de sua metodologia julgado como satisfatório, uma vez que os parâmetros de resistência obtidos nas retroanálises foram similares aos valores médios obtidos de ensaios em laboratório.

Oliveira (2024), ao apresentar sua metodologia, realizou para fins de validação testes em taludes simplificados e hipotéticos, variando as condições de contorno analisadas (como saturação, estratigrafia do talude e forma de ruptura) e as metodologias de busca. Tal abordagem, é importante para atender ao objetivo da metodologia de ser mais abrangente em termos de aplicabilidade.

A partir desta validação isolada que autores realizam ao propor novas metodologias, Moscateli (2017) realizou um estudo comparativo de duas metodologias de retroanálise para que seja possível analisar a aplicabilidade desses métodos nas condições impostas pelo seu caso de estudo. Em seu trabalho, ao comparar a metodologia observacional de Lopes (1981) com o método tradicional de retroanálise de Morgenstern-Price (1965), seus resultados foram satisfatórios em ambas as metodologias, pautando essa conclusão e suas discussões em ensaios de laboratório.

Dessa forma, a função de trabalhos comparativos entre métodos de retroanálise são pertinentes no contexto atual, visto que essa ferramenta é fundamental para auxiliar na avaliação mais assertiva da condição do talude no momento da ruptura. Além disso, aplicar uma metodologia em diferentes casos demonstra sua assertividade frente a grande variabilidade que um talude pode apresentar em termos de geometria e estratigrafia, por isso é necessário contrapor tais análises com métodos mais consolidados e ensaios de laboratório. Por conta disso, este trabalho se insere neste cenário realizando um comparativo de parâmetros de resistência obtidos pelo método de Gomes (2003), Oliveira (2024) e ensaios de laboratório.

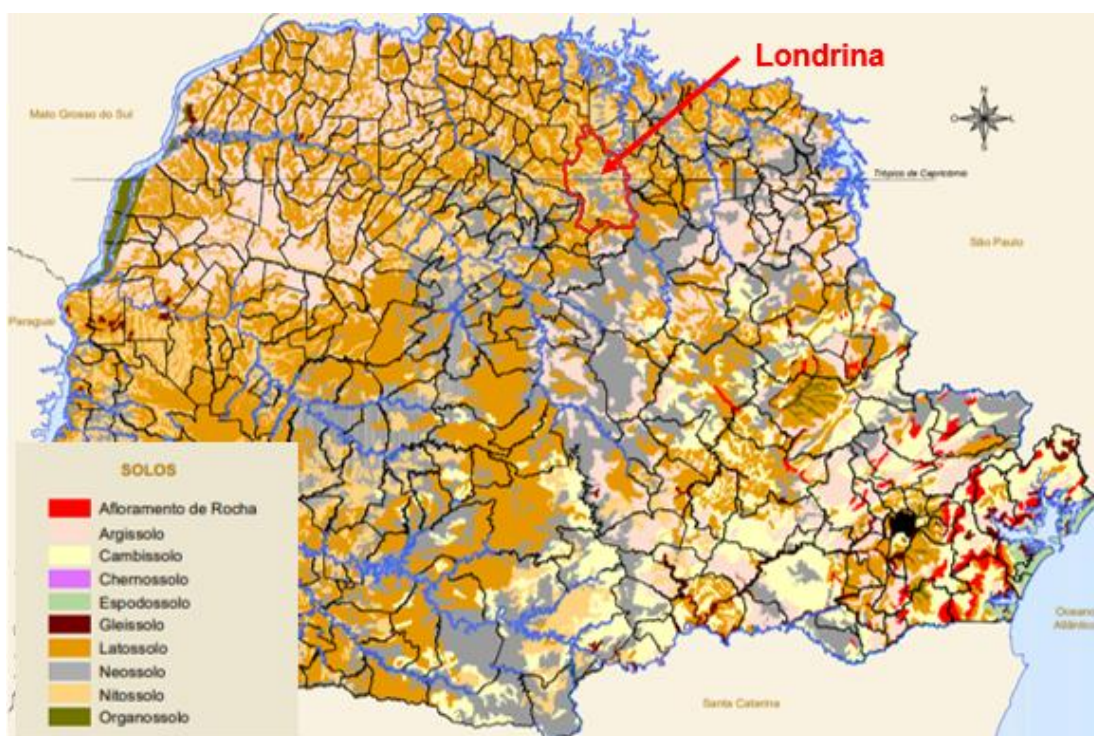
4 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO EM ESTUDO

Nesta seção, são apresentadas todas as informações pertinentes ao caso em estudo, com uma breve apresentação da geologia do local, a localização do maciço em que houve a ruptura e resultados dos ensaios de laboratório para caracterização dos diferentes solos que compõem a seção do talude em análise.

4.1 TIPOLOGIA DO SOLO REGIONAL

O talude utilizado como objeto de estudo está inserido na cidade de Londrina/PR (Figura 22), na qual há uma grande predominância de latossolo e nitossolo, remetendo ao solo um aspecto avermelhado e com maiores profundidades. O solo desta região é originado de uma rocha basáltica e caracterizado como argila siltosa devido a sua granulometria (GONÇALVES *et al.*, 2018).

Figura 22 – Mapa de solo do estado do Paraná.



Fonte: Adaptado de Instituto de Terras, Cartografia e Geociências (2008).

Latossolos, que são comuns em cidades que tem seu solo formado sob condições similares a de Londrina, possuem um perfil típico subdividido em horizontes A, B e C, sendo que estes possuem granulometria, cor e mineralogia

distintas, tornando-os distinguíveis. Além disso, o horizonte B costuma apresentar elevado volume de vazios, o que o torna um solo de maior permeabilidade e baixa massa específica aparente, aspectos comuns de solos lateríticos. Essa laterização do solo também afeta sua estrutura, compondo-a tipicamente com um maior nível de agregação dos sólidos e possível bimodalidade destes poros, o que tem influencia no comportamento não saturado deste material.

Em uma análise do perfil de solo obtido por SPT (*Standard Penetration Test*), CPT (*Cone Penetration Test*) e DMT (*Dilatometer Marchetti Test*), atribuiu-se ao solo de Londrina um Horizonte A de 0,5 metros com presença de matéria orgânica, um horizonte B de 11 metros laterizado e um horizonte C, com alteração de rocha basáltica (TEIXEIRA, R. S.; SOBRINHO; BRANCO, 2006).

4.2 CASO EM ESTUDO

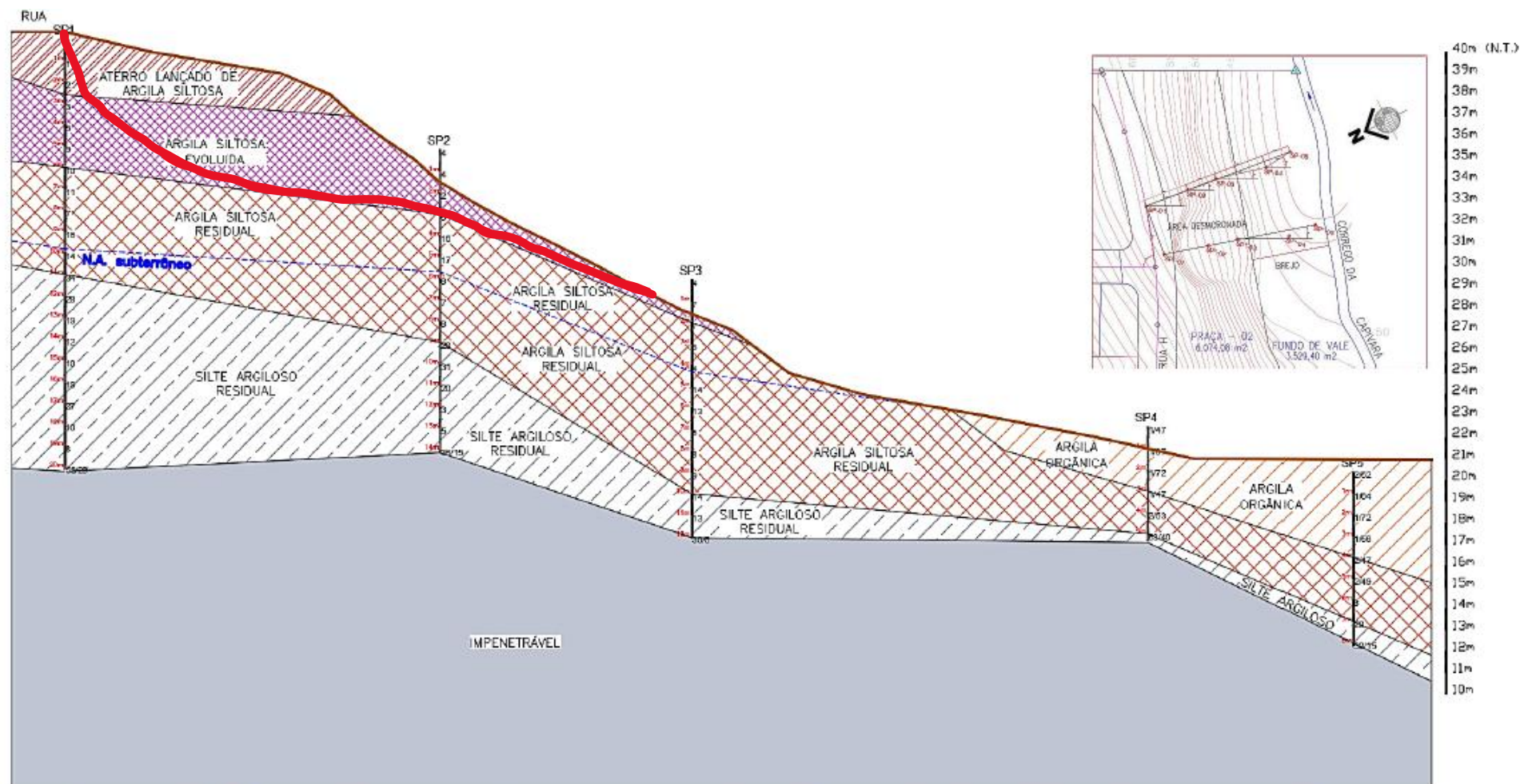
O talude real deste estudo sofreu uma ruptura em dezembro de 2009, com um registro visto na Figura 23. Em seu entorno, o maciço apresenta na parte superior (crista) uma rua que leva a um acesso de serviço de um condomínio, já na parte inferior, há um córrego que passa próximo ao pé deste talude. Suas dimensões antes do escorregamento eram de, aproximadamente, 30 metros de altura e 66 metros de extensão, sendo que ao longo de seu comprimento tal estrutura apresentava diferentes inclinações, variando entre 18 e 30°. A localização mais precisa deste talude não pode ser especificada por fins de confidencialidade com a empresa que cedeu tais informações.

Figura 23 – Registro de campo da ruptura do talude utilizado neste estudo.



Fonte: Pelaquim (2021).

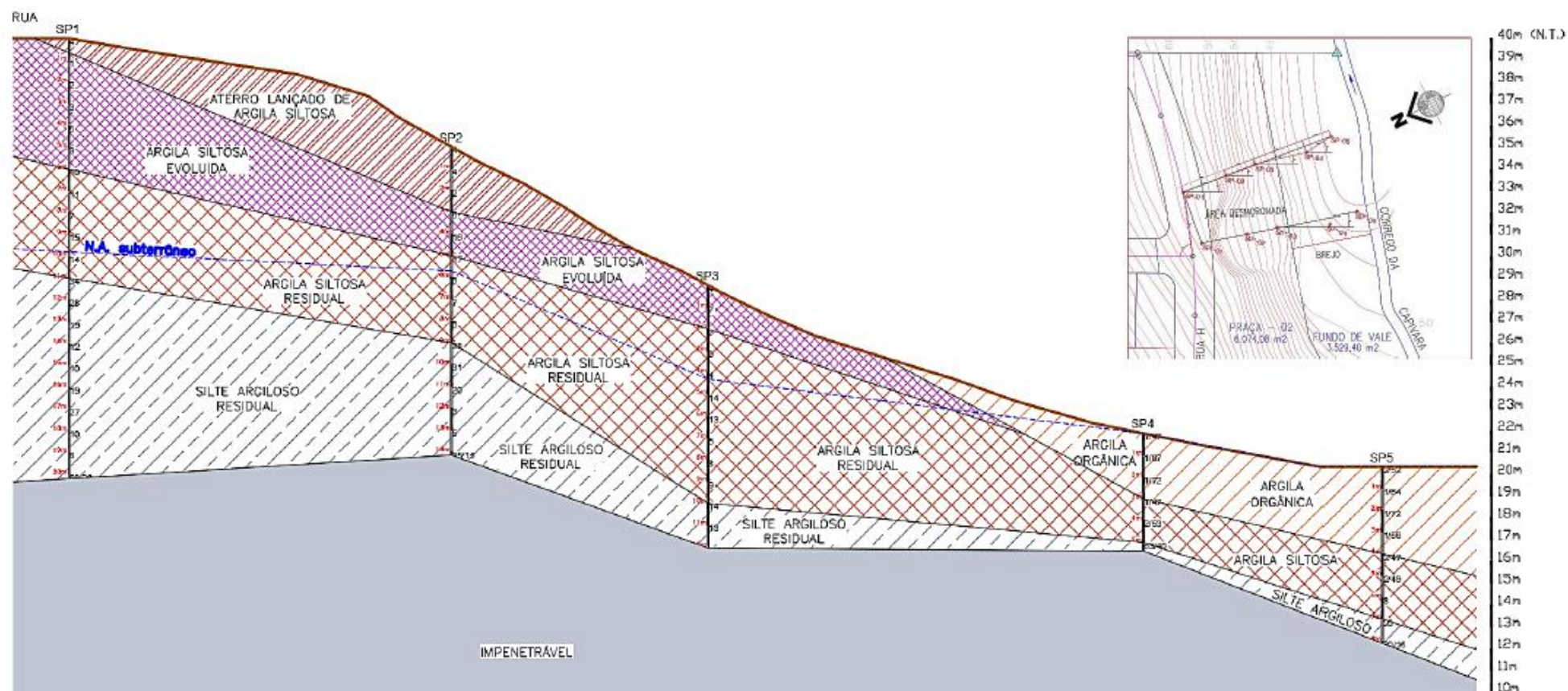
Figura 25 – Seção S1 do talude – Seção da área desmoronada já reconstituída indicando a superfície de ruptura observada em campo.



Nota: Os pontos de SPT foram rebatidos para a área escorregada e as alturas foram corrigidas considerando as cotas topográficas.

Fonte: Adaptado de Pelaquim (2021).

Figura 26 – Seção S2 do talude – Seção de referência fora da área desmoronada.



Fonte: Pelaquim (2021).

A partir da análise das sondagens colocadas no Apêndice A, foi observado que, em ambas as seções, há uma camada de aterro de argila siltosa na crista do talude com N_{spt} médio de 3 (provável aterro para construção da pista de rolamento), seguido de uma argila siltosa evoluída com N_{spt} de 5 e uma argila siltosa residual de N_{spt} médio 11. Ao pé do talude há uma argila orgânica de N_{spt} quase 0 e antes de se alcançar o impenetrável é encontrado um silte argiloso residual com N_{spt} médio próximo de 30. Estes valores foram utilizados para definição da estratigrafia do solo juntamente com a análise tátil-visual feita em campo durante as sondagens.

É importante ressaltar que a camada de aterro apresentada nas seções foi considerada como parte da camada adjacente. Isso se deve ao fato do material que compõe a camada de aterro ser um solo similar à camada abaixo desta, do ponto de vista visual-tátil analisado em campo. Tal constatação somada ao visível baixo grau de compactação traz essa similaridade entre camadas. Do ponto de vista da estabilidade, essa é uma alternativa simplificada para esta questão, uma vez que um aterro com pouca contribuição para a resistência do maciço pode também funcionar como uma sobrecarga no perfil natural, reduzindo seu fator de segurança. No entanto, esse cenário não foi considerado.

Embora não considerado durante as análises, esse baixo grau de compactação pode ser um dos fatores que contribuíram para a ruptura do talude, gerando deformações e fissuras do pavimento acima, possíveis caminhos preferenciais de percolação. Não houve análises destas condições ou registros prévios da condição desta via, logo, tal hipótese não foi testada.

Relativo aos ensaios para obtenção dos parâmetros de resistência do solo, Pelaquim (2021) desenvolveu ensaios de cisalhamento direto lento com amostras indeformadas do solo, repetindo o ensaio para tensões normais de 50, 100, 200 e 300 kPa e adotando como critério de parada uma deformação limite de 10% indicado pela norma D3080 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM).

Como não havia controle de sucção neste equipamento, as amostras ensaiadas contemplavam a condição saturada e não saturadas com auxílio da curva característica solo-água (CCSA). Para ensaio de amostras não saturadas, utilizou-se corpos de prova não inundados, com sucção estimada a partir da determinação da umidade da amostra e da CCSA. Para a condição saturada, fez-se o uso de amostras inundadas. Outros ensaios também foram executados para caracterização, como a determinação massa específica do solo.

A partir destes ensaios realizados, os parâmetros de resistência das camadas de solo do talude e seus respectivos pesos específicos serão colocados na Tabela 3. Estes valores serão os principais dados de entrada utilizados no software de análise de estabilidade e serão os parâmetros de referência para a resistência da camada retroanalizada, que corresponde a camada de argila siltosa evoluída. É válido ressaltar que esta foi a camada retroanalizada devido ao fato da superfície de ruptura observada em campo está contida inteiramente nessa camada.

Tabela 3 – Parâmetros de resistência obtidos em laboratório para este talude.

CAMADA DA SEÇÃO	c' (kPa)	ϕ' (°)	γ (kN/m³)
Argila siltosa evoluída	3,2*	23*	16
Argila siltosa residual	25	23	20
Silte argiloso residual	20	28	21
Argila orgânica	4	-	13

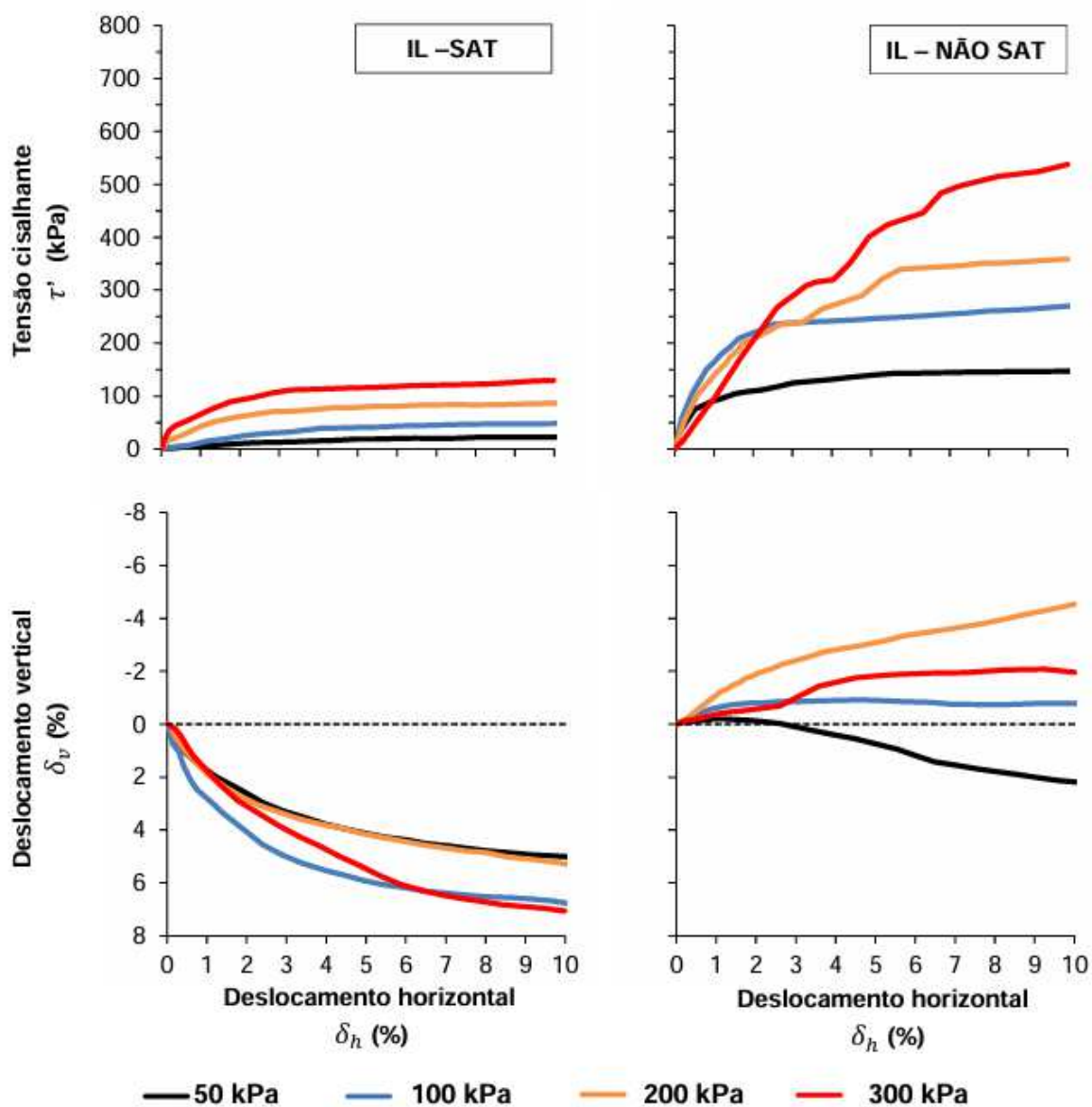
**Estes valores obtidos para a camada a ser retroanalizada serão comparados com os resultados de retroanálises*

Fonte: Adaptado de Pelaquim (2021).

Como pode ser observado, as diferenças entre as coesões efetivas medidas para os solos residuais e o solo evoluído esclarecem o motivo da superfície de ruptura permanecer na camada superficial, já que o solo subjacente apresentou uma coesão efetiva quase 8 vezes maior. A argila orgânica, embora possua propriedades de resistência inferiores as demais camadas, não influenciou na ruptura por estar contida no trecho mais próximo do pé do talude, onde a inclinação é relativamente baixa e está afastada da região em que houve o colapso.

Para a camada a ser retroanalizada, as curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal e deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal (de cada uma das quatro tensões normais ensaiadas), serão colocadas na Figura 27.

Figura 27 – Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal e deslocamento vertical x deslocamento horizontal



OBS: IL= solo indeformado, ensaio lento.

Fonte: Adaptado de Pelaquim (2021).

Nestas curvas de tensão cisalhante, observa-se um padrão de crescimento sem picos, um comportamento típico de solos ensaiados na condição normalmente adensado. Agora, a Figura 28 apresenta a envoltória de ruptura deste solo na condição saturada e não saturada, seguida da Tabela 4 que expõe a equação das envoltórias.

Figura 28 – Envoltórias de ruptura do solo – Ensaios lentos

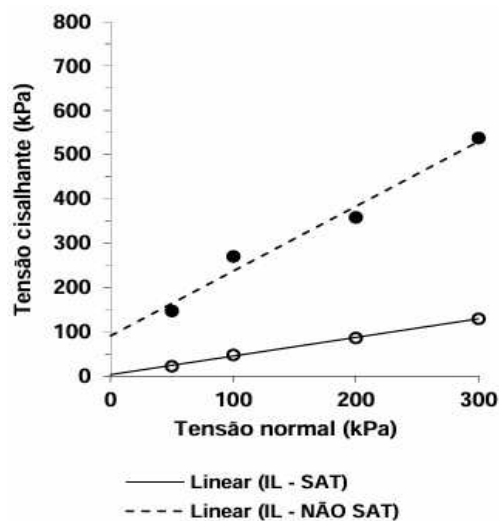


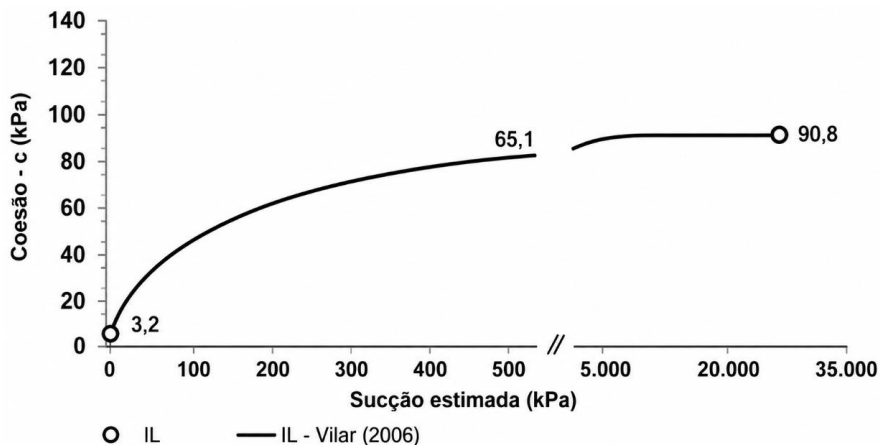
Tabela 4 – Envoltórias de cisalhamento do solo – ensaios lentos

Condição do solo	
Saturado	Não saturado
$\tau'(kPa) = 3,2 + (\sigma - u_a) \cdot tg 23^\circ$	$\tau'(kPa) = 90,8 + (\sigma - u_a) \cdot tg 56^\circ$

Fonte: Adaptado de Pelaquim (2021).

Frente ao exposto, a autora também desenvolveu a curva da envoltória não planar da resistência ao cisalhamento do solo com base no modelo hiperbólico de Vilar (2006). Essa curva está colocada na Figura 29.

Figura 29 – Coesão (c) x sucção estimada do solo indeformado.



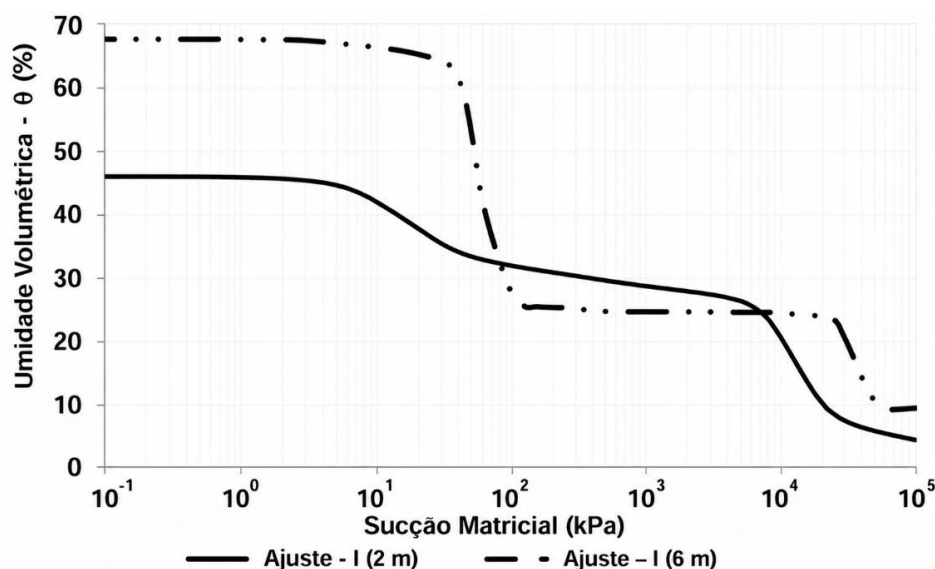
OBS: IL= solo indeformado, ensaio lento.

Fonte: Adaptado de Pelaquim (2021).

Ainda no trabalho dessa autora, para a determinação da curva característica solo-água foi feita uma mescla de pontos obtidos por meio do ensaio da Câmara de Richards e pelo método do papel filtro, ambos sob trajetória de secagem. Essa combinação se deve pela limitação de pressão das câmaras disponíveis, limitando a pressão aplicada nas amostras de solo ao intervalo de 0 a 1000 kPa. Dessa forma, utilizou-se o método do papel filtro para ensaio de amostras acima desse limite de sucção e foi plotada a curva pelo ajuste de Gitirana Jr e Fredlund (2004).

As curvas características de ambas as camadas de solo que se apresentam na condição não saturada (argila siltosa evoluída e residual) serão apresentadas na Figura 30, identificadas de acordo com sua profundidade no perfil. A camada de solo a 2 metros de profundidade corresponde à argila siltosa evoluída e a 6 metros de profundidade à argila siltosa residual.

Figura 30 – Curva característica dos solos não saturados do talude.



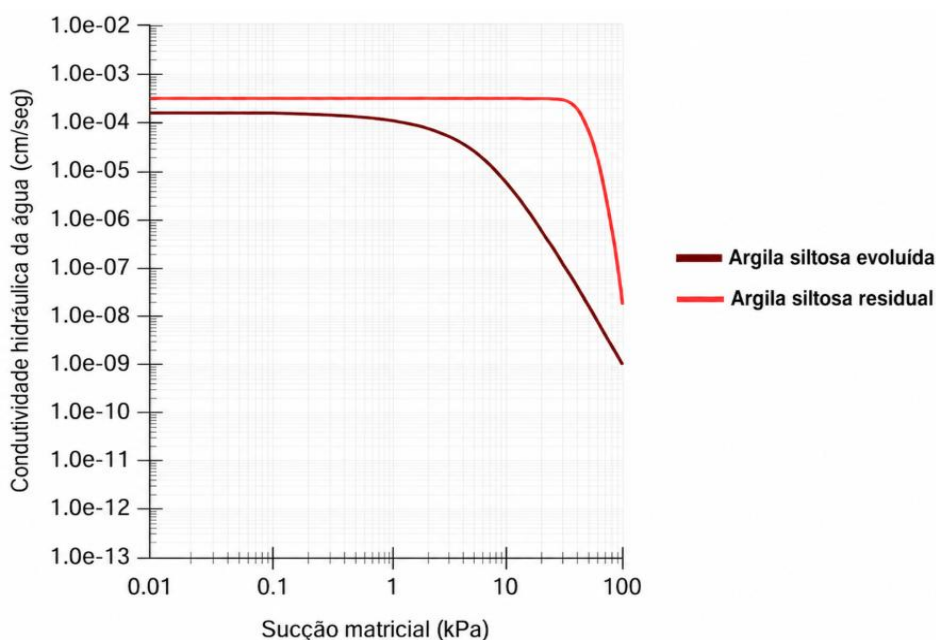
Fonte: Adaptado de Pelaquim (2021).

Vale ressaltar que a curva solo-água na profundidade de 6 metros foi determinada no trabalho de Miguel *et al.* (2006), na qual, segundo Pelaquim (2021), foi observada uma semelhança com a camada de argila siltosa residual e por isso foi adotada como curva característica para este solo presente no perfil do talude.

Pelaquim (2021) justifica essa disparidade entre as curvas características das camadas pelo índice de vazios médios que cada solo apresenta, constatando índice de vazios menores na camada mais profunda e, consequentemente, menor teor de umidade gravimétrica para sua saturação.

A autora também trouxe as curvas de condutividade hidráulica das camadas, as quais são dados de entrada fundamentais dentro do software para a simulação do comportamento hidráulico do talude e obtenção da distribuição da poropressão no momento da ruptura. Estas funções de condutividade foram estimadas segundo as curvas características apresentadas na figura anterior, descrevendo como o fator de condutividade hidráulica do solo se comporta frente à variação da sucção no solo. As curvas obtidas serão apresentadas na Figura 31.

Figura 31 – Curva estimada da condutividade hidráulica x sucção dos solos não saturados no talude.



Fonte: Adaptado de Pelaquim (2021).

É importante ressaltar que ambas as curvas foram estimadas pelo modelo de Van Genuchten, que faz uso das curvas características. Embora fosse possível obter valores para sucções maiores que 100 kPa, as curvas se limitaram a esse valor por já ser suficiente para demonstrar o comportamento do solo nas sucções mais comuns que são vistas em campo.

A partir deste levantamento apresentado, tem-se as informações necessárias para a realização do estudo do comportamento hidráulico do talude e para a posterior retroanálise da seção dentro do software PLAXIS LE.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção contém a apresentação da metodologia que este estudo segue durante as análises, além de definir e explicar os métodos de retroanálise que são aplicados fazendo uso do software PLAXIS LE V21.

5.1 METODOLOGIA DE ESTUDO

Com o foco em comparar parâmetros de resistência do solo obtidos de diferentes métodos de retroanálise considerando a não saturação do solo no momento da ruptura, o estudo seguirá as etapas colocadas na Figura 32.

Figura 32 – Etapas da metodologia da pesquisa.



Fonte: O autor.

Essa padronização inicial é importante para definir com clareza as condições em que este estudo será pautado, isolando as variáveis de interesse que são os parâmetros de resistência do solo da camada retroanalizada.

Como já mencionado, todas as retroanálises foram realizadas pelo PLAXIS LE V21 a partir da extensão *Slope Stability* e fazendo uso do método de equilíbrio limite de Morgenstern-Price, poris este permite uma análise mais rigorosa das forças em cada lamela. Já para as análises de comportamento hidráulico da seção, fez-se o uso da extensão *Groundwater* que permite vincular os resultados de poropressão do talude na análise de estabilidade.

5.2 SEÇÃO DO TALUDE E SUPERFÍCIE CRÍTICA

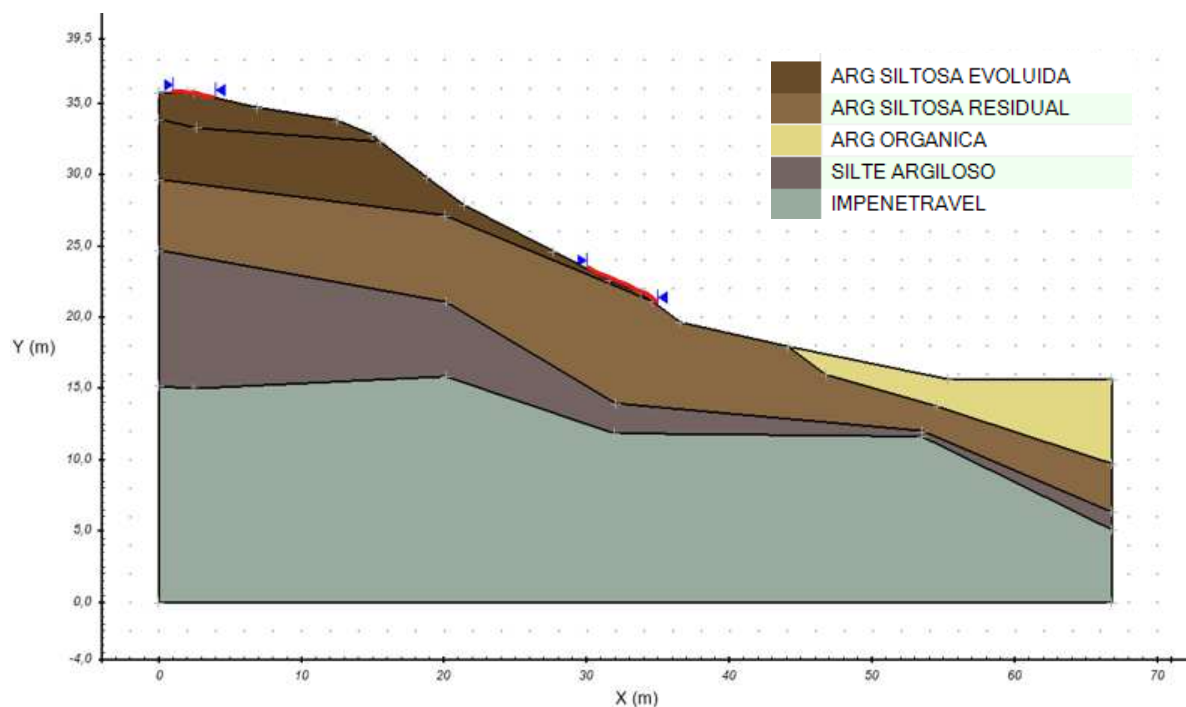
Conforme os dados levantados do talude real, foi modelada a seção sob análise no software PLAXIS LE V21 para efetuar a simulação de infiltração da chuva no solo e, na sequência, as retroanálises deste estudo. A seção adotada foi apresentada no item 4.2, onde foi apresentada a seção reconstituída da área desmoronada com base em sondagens SPT feitas em campo.

Relativo ao método de busca para a superfície de ruptura, cada um dos dois métodos de retroanálise aplicados necessitou de métodos de busca diferentes para satisfazer suas metodologias.

Para o método de Oliveira (2024), frente à gama de métodos disponíveis, optou-se pelo uso do método *Cuckoo Search*, visto que este é um método trabalhado pela autora e é uma das alternativas para busca de superfícies críticas não circulares, sendo esse o padrão da superfície real de ruptura observado em campo. Além disso, este método de busca necessita de poucos parâmetros de entrada (apenas número de *nests*, interações e vértices), os quais são fixados a partir de uma análise iterativa prévia, buscando equilibrar tempo de processamento e variação no fator de segurança final de cada análise.

Como a posição da superfície de ruptura de campo é conhecida, também foram estabelecidos limites para o início e fim das superfícies geradas, de modo que a busca realizada pelo software fique limitada à região de interesse desta retroanálise e não à análise crítica global deste talude. A Figura 33 apresenta o posicionamento destes limites na seção do talude a ser analisada.

Figura 33 – Seção do talude modelada no PLAXIS LE V21 destacando os limites de superfície de ruptura.



Fonte: O autor.

Para definir os valores de entrada deste método de busca para a superfície de ruptura, alguns testes foram realizados variando os três dados de entrada, que são a quantidade de ninhos (*nests*), quantidade de interações (ambos definem a quantidade total de tentativas para cada par de valores da retroanálise) e número de vértices em uma superfície gerada. Esse processo foi repetido até que houvesse um equilíbrio entre tempo de processamento e influência destas mudanças na variação do fator de segurança. Ao final deste processo, chegou-se aos valores de 30 *nests*, 400 interações e 30 vértices para a superfície de ruptura.

No método de Gomes (2003), visto que sua aplicação parte da determinação da superfície real dentro do software de análise, optou-se por utilizar o método *Fully-specified* para concordar com o padrão de superfície não-circular do talude real e especificar com precisão o formato da superfície de ruptura observada em campo, já que este é um dos requisitos para aplicação do método.

No quesito de método de cálculo para o comportamento do solo, para as camadas não saturadas (argila siltosa evoluída e residual) foi utilizado a equação de Vanapalli *et al.* (1996), visto que este método parte da curva característica do solo e este é um dado conhecido para ambas as camadas não saturadas. Conforme

destacado por Dal-Cól (2022), a equação desenvolvida por Vanapalli se destaca na consideração do incremento não linear de resistência devido à variação da sucção, agregando diretamente parâmetros da curva característica para quantificar o incremento mencionado.

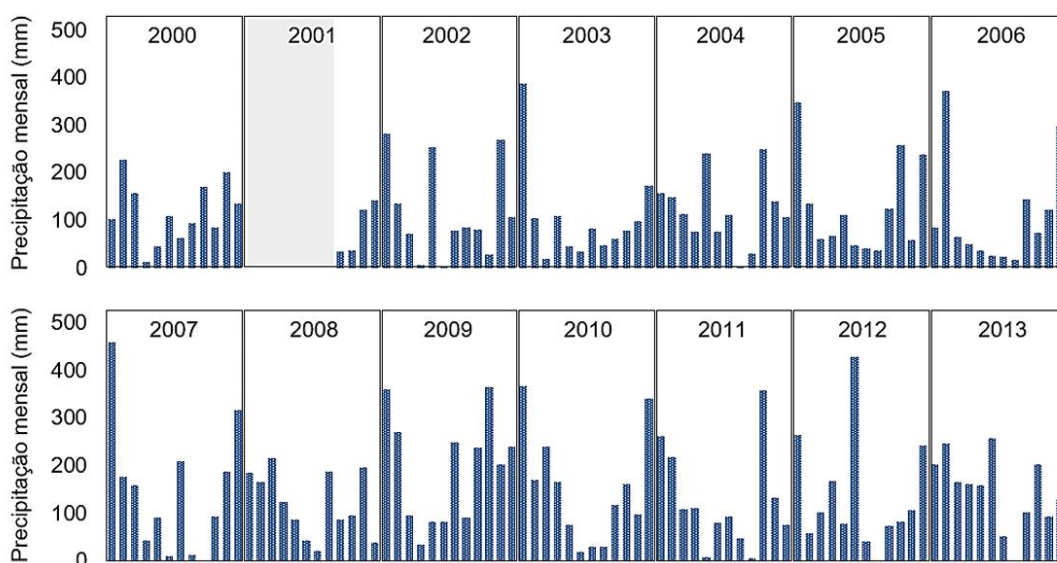
Para as demais camadas de solo (solos saturados), utilizou-se o método tradicional de Mohr Coulomb por ser o método mais recorrente para análises de solo sob essa condição. Além disso, essas camadas não afetam a retroanálise, visto que a superfície de ruptura não passa por elas.

5.3 PERFIL DE DISTRIBUIÇÃO DA POROPRESSÃO NO TALUDE

Por se tratar de uma análise de estabilidade do talude em condições não saturadas, é necessário especificar como se dá a distribuição da poropressão na seção do talude, o que é possível a partir de uma análise de comportamento hidráulico do maciço feita pela extensão do PLAXIS LE denominada *Groundwater*.

Este tipo de simulação se trata de uma análise estacionária, a qual parte da caracterização das propriedades hidráulicas das camadas de interesse e da definição do volume de chuva. Para a definição deste último, fez-se o uso do histórico de dados pluviométricos da região disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia e apresentados dos Pelaquim (2021). Estes dados serão apresentados na Figura 34.

Figura 34 – Histórico de precipitação em Londrina de 2000 a 2013.



Fonte: BPMET *apud* Pelaquim (2021).

Para definir o volume de chuva, estimou-se uma taxa inicial de chuva por segundo partindo do histórico pluviométrico do mês em que a ruptura ocorreu (dezembro de 2009). O tempo de ocorrência dessas chuvas simuladas, a fim de reduzir o tempo para realizar cada simulação, foi fixado em 24 horas. Adotou-se uma análise estacionária, sem consideração de eventos de chuva precedentes e com superfície de infiltração em toda a face superior do talude.

Para essa análise de percolação, algumas propriedades hidráulicas do talude são necessárias como dados de entrada para descrever o comportamento de cada camada frente à infiltração de água. Estes dados aplicados dentro do PLAXIS serão apresentados na Tabela 5. É importante ressaltar que os coeficientes de condutividade hidráulica saturados (k_{sat}) das camadas foram obtidos por ensaios de laboratório tradicionais (permeâmetros), por Weiss (2010).

Tabela 5 – Parâmetros hidráulicos de entrada no software para simulações de comportamento hidráulico do talude.

CAMADA DA SEÇÃO	Comportamento	Curva característica	Condutividade hidráulica	k_{sat} (m/s)	θ_{sat} (%)
Argila siltosa evoluída	Não saturado	Figura 30 deste trabalho	Figura 31 deste trabalho	$1,6 \times 10^{-5}$	45,8
Argila siltosa residual	Não saturado	Figura 30 deste trabalho	Figura 31 deste trabalho	$3,2 \times 10^{-5}$	67,9
Silte argiloso residual	Saturado	-	-	$1,0 \times 10^{-8}$	-
Argila orgânica	Saturado	-	-	$2,0 \times 10^{-6}$	-
Impenetrável	Saturado	-	-	$1,0 \times 10^{-15}$	-

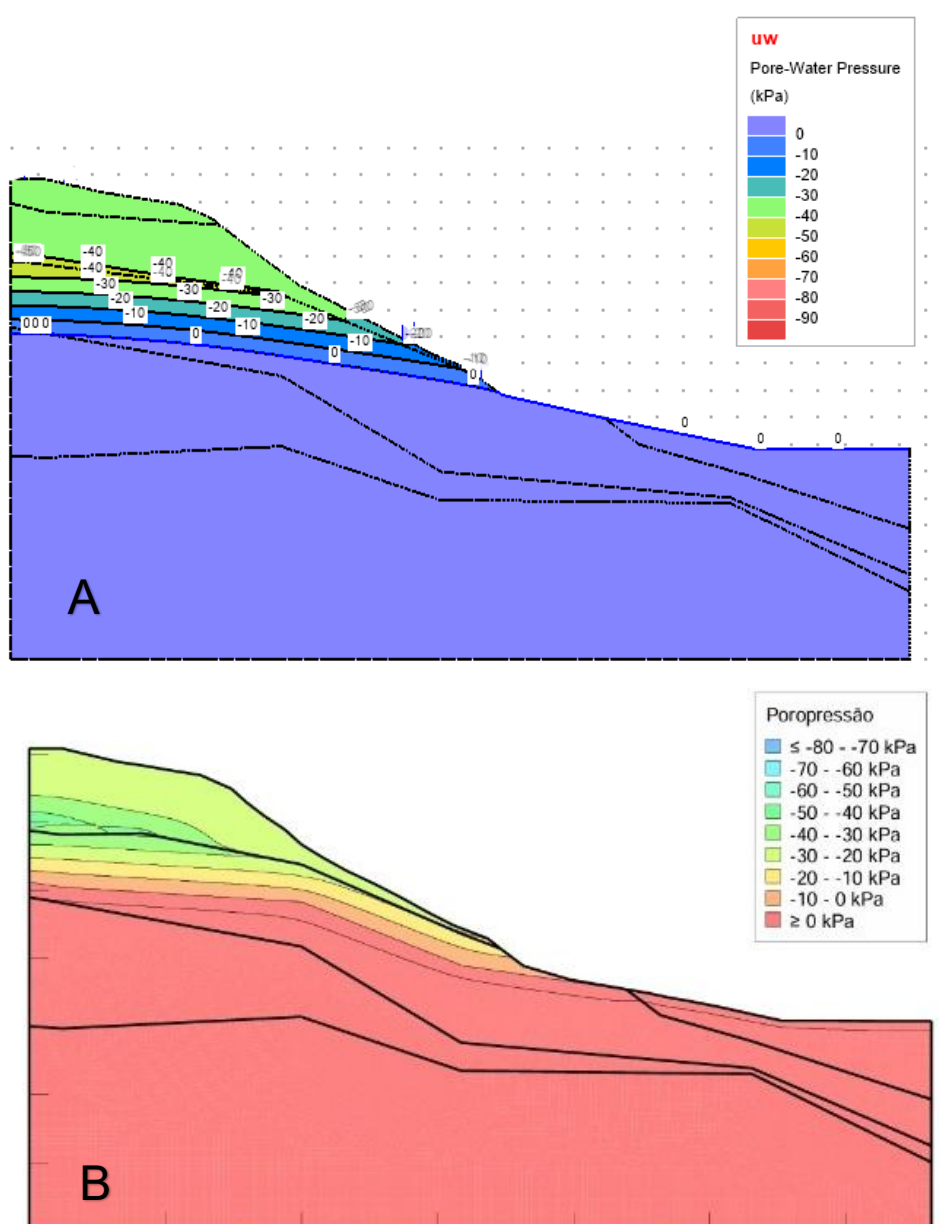
Fonte: Adaptado de Pelaquim (2021).

Pelaquim (2021) realizou em seu trabalho uma análise refinada do comportamento hidráulico deste mesmo talude, partindo destes mesmos dados apresentados na tabela anterior.

Sob esse viés, para decidir a distribuição de poropressão no talude que representa a condição no momento da ruptura, todas as simulações realizadas para este trabalho foram comparadas com o resultado de Pelaquim (2021), a fim de obter uma distribuição em que o formato e magnitude da poropressão no talude fosse semelhante ao da autora.

Dessa forma, ao final das análises foi obtido um resultado satisfatório para essa pesquisa (Figura 32A) que apresenta um formato de distribuição e magnitude de valores para poropressão concordantes com a distribuição obtida por Pelaquim (2021), que está apresentada na Figura 32B. Este resultado é proveniente do processo iterativo já citado, aumentando a intensidade da chuva aplicada no período fixado de 24 horas até que ambos os resultados fossem similares.

Figura 35 – Seção do talude com distribuição da poropressão do autor (A) e resultado de Pelaquim (2021) (B).



Fonte: O autor.

Ao comparar estes resultados, observa-se que a variação da poropressão está entre 0 e -50 kPa em ambos os casos, com os valores próximos de -50 kPa se concentrando na região mais aproximada da crista em que as camadas de solo alternam de argila siltosa evoluída para a residual.

5.4 MÉTODOS DE RETROANÁLISE APLICADOS

Neste estudo serão aplicados o método de retroanálise proposto por Oliveira (2024) e Gomes (2003). O primeiro foi escolhido por ser recente e mais abrangente dentre as possibilidades de aplicação, já o segundo será um método referencial por já estar mais consolidado na literatura e permitir uma avaliação comparativa das limitações de cada abordagem.

O método proposto por Oliveira (2024) tem como princípio uma análise interativa dos parâmetros de resistência do solo, trazendo essas interações de forma automatizada para otimização da análise. Dessa maneira, o método selecionado para ser aplicado em paralelo foi proposto por Gomes (2003), no qual é desenvolvido uma análise inicial dos parâmetros do solo para a camada retroanalizada antes da aplicação do software de análise geotécnica.

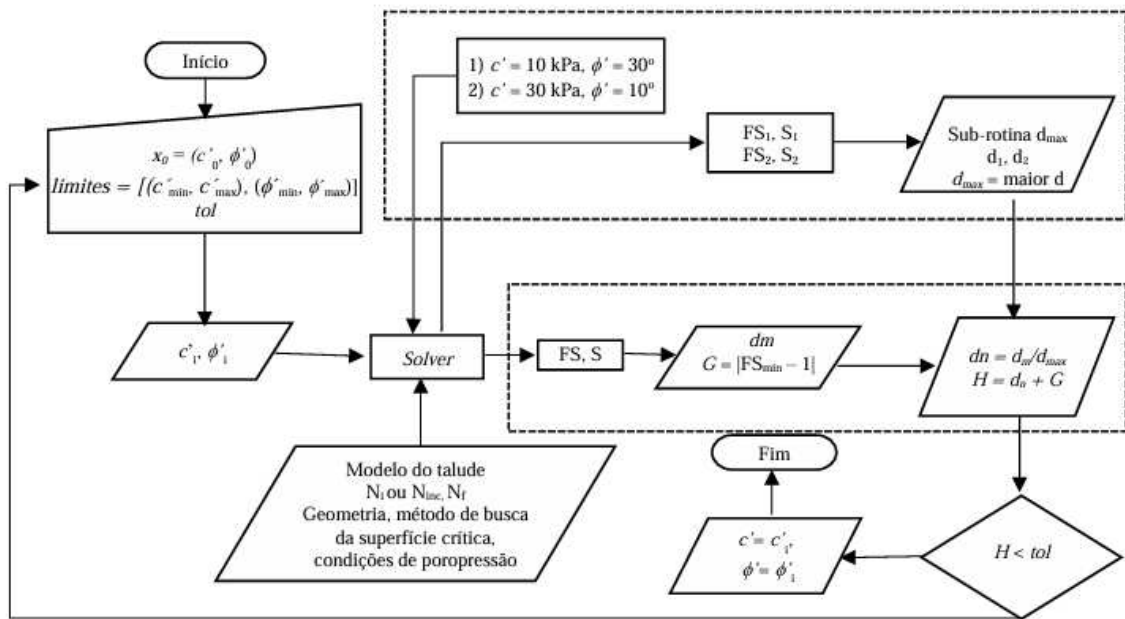
5.4.1 Método proposto por Oliveira (2024)

A autora propõe uma metodologia baseada em uma função objetivo H , capaz de considerar tanto a distância entre uma superfície gerada por uma análise de estabilidade e a superfície real de ruptura, quanto o fator de segurança. Para viabilizar essa função objetivo, foi necessário definir corretamente um mínimo global, a fim de estabelecer a viabilidade ou não de uma otimização da função, que por sua vez alcança apenas um conjunto de parâmetros de resistência que represente a solução da retroanálise. Essa função (Equação 5) une duas variáveis que são a distância normalizada (d_n) e a função G .

$$H = d_n + G \quad \text{Eq. 5}$$

O algoritmo desenvolvido pela autora permite a utilização de diferentes métodos de busca da superfície e de otimização, tornando a proposta mais abrangente e buscando atender até mesmo a análises de taludes 3D. Para melhor demonstração, a Figura 36 apresenta o fluxograma que representa a metodologia proposta.

Figura 36 – Fluxograma do método proposto por Oliveira.



Fonte: Oliveira (2024).

Neste trabalho não será aplicado o código desenvolvido pela autora, porém a análise manual seguirá as mesmas etapas contidas nele. Tais etapas da metodologia consistem em:

- Determinação do intervalo de valores para o ângulo de atrito efetivo (ϕ') que será aplicado;
- Estabelecer um intervalo de valores para coesão efetiva (c') que serão testados para cada valor de ϕ' ;
- Aplicação de cada par de valores dos parâmetros de resistência do solo a ser retroanalisado.
- Critério de escolha para os parâmetros de resistência representativos do solo: fator de segurança (FS) abaixo de 1 e superfície de ruptura gerada mais próxima da real.

É importante ressaltar que para essa avaliação da superfície de ruptura gerada foi feita uma análise visual e geométrica, comparando principalmente os pontos de entrada e saída da superfície, profundidade e forma que ela apresenta em relação à superfície observada em campo.

Nesta aplicação, foi definido um intervalo de variação de 1 a 10 kPa para c' e de 10 a 30° para ϕ' , o que irá gerar 210 fatores de segurança a serem analisados. Desta maneira, considerando o critério de escolha para os parâmetros representativos do solo, haverá ao final um par de valores para c' e ϕ' que resulta em uma superfície de ruptura mais fiel a condição real.

5.4.2 Método de Gomes (2003)

A metodologia de Gomes (2003) para a retroanálises de taludes propõe o desenvolvimento de curvas envolvendo os parâmetros de resistência do solo e o fator de segurança resultante para definir o par de valores mais representativo das condições de resistência do solo no momento da ruptura.

Segundo Gomes (2003), as alternativas para se realizar uma retroanálise consistem em um processo trabalhoso de tentativa e erro, pois uma vez fixadas as condições de contorno do problema (que incluem geometria do talude antes da ruptura, superfície pós-ruptura e as condições de pressão neutra), um processo repetitivo acontece até que se tenha um par de valores de coesão e ângulo de atrito que satisfaça a condição $FS=1$ e resulte em uma superfície próxima a real.

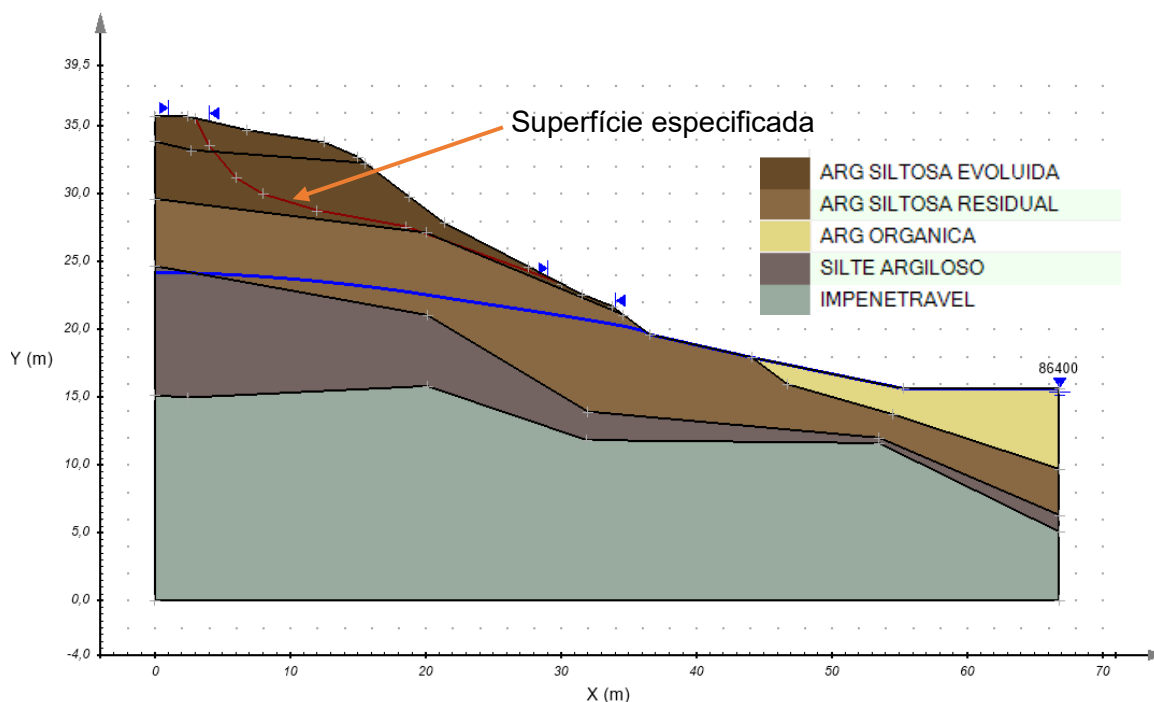
Assim sendo, o autor propõe um método que consiste em:

- Gerar uma curva $c' \times \phi'$ a partir de algum método de estabilidade por equilíbrio limite;
- Pesquisar a superfície de ruptura gerada pelos pares de valores que compõem a curva;
- Representar graficamente os fatores de segurança obtidos e selecionar o mais próximo de 1

Em vista disso, para que seja possível obter essa curva $c' \times \phi'$ foi necessário utilizar um método de busca das superfícies críticas que permita fixar o formato que ela deve atender ao aplicar o método de equilíbrio limite. Logo, fez-se o uso do método *Fully Specified* que é disponibilizado dentro do PLAXIS LE e permite

definir a superfície por meio de segmentos de reta, que neste caso foram utilizados um total de 10 segmentos definidos com base na superfície observada em campo. A Figura 37 apresenta a superfície especificada.

Figura 37 – Superfície de ruptura especificada pelo método *fully specified*.



Fonte: O autor.

Quando se tem definido o par de valores de parâmetros de resistência finais da retroanálise, estes foram reinseridos no software para visualização da superfície de ruptura gerada, com um limite maior de 350 otimizações para esse mesmo método de busca de superfície, a fim de permitir possíveis ajustes de convergência da superfície mais crítica para estes parâmetros de resistência sem comprometer o tempo computacional necessário.

5.5 ANÁLISE COMPARATIVA E SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DO SOLO

Com base nos resultados obtidos de ensaios de cisalhamento direto apresentados na seção 4.2, os resultados de parâmetros de resistência do solo retroanalisado serão comparados para verificar a proximidade de resultados obtidos em software com dados de laboratório. Dessa maneira, é possível compreender qual

simulação tem maior proximidade com a condição de campo, sendo esse o cenário esperado para uma retroanálise.

Um comparativo de superfícies de ruptura obtidas também se mostra necessário, uma vez que a superfície de ruptura de campo é conhecida e a retroanálise tem como foco compreender as condições de resistência do solo para aquele evento em específico.

Posto isso, será feita uma avaliação das semelhanças e divergências entre ambas as superfícies de ruptura obtidas pelo software, bem como a contraposição destes resultados de simulações com a superfície observada em campo. Tal análise será feita de forma visual com enfoque em pontos notáveis como início da superfície, fim e curvatura apresentada. É importante ressaltar que estas superfícies partem de métodos de busca diferentes, além de não serem a única alternativa para realizar tais buscas.

Desse modo, divergências são esperadas ao se comparar os resultados, logo, é importante agregar essa análise ao cenário global da retroanálise e não como um fator isolado. A forma da superfície, somada aos resultados de parâmetros de resistência, permite compreender a convergência entre os dados de análise computacional e o evento de colapso em estudo.

Em seguida, uma investigação da sensibilidade dos parâmetros de resistência do solo será desenvolvida com base no maior volume de dados obtidos do método de Oliveira (2024), para verificar como se dá o comportamento do fator de segurança do talude frente a variações unitárias dos parâmetros de resistência.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Partindo das informações apresentadas, nesta etapa serão apresentados e discutidos os resultados obtidos de ambos os métodos, considerando parâmetros de resistência e superfície de ruptura gerada, além de compara com dados de laboratório.

6.1 Método de Oliveira (2024)

O método proposto pela autora, por se tratar de um procedimento de múltiplas iterações executadas por programação, mas que neste estudo foi realizado manualmente, gerou um total de 210 fatores de segurança, provenientes dos pares de valores de parâmetros de resistência do solo possíveis a partir dos intervalos de análise estipulados no item 5.4.1 desta pesquisa. Para facilitar a apresentação de resultados, foram filtrados apenas os resultados em que o fator de segurança resultante foi menor ou igual a 1 (Tabela 6). No Apêndice B consta todos os resultados obtidos.

Tabela 6 – Resumo dos resultados do método de Oliveira (2024).

Ângulo de atrito efetivo (ϕ')	Coesão efetiva (c')	Fator de segurança (FS)
10	1	0,629
11	1	0,684
12	1	0,728
10	2	0,738
13	1	0,782
11	2	0,791
10	3	0,832
12	2	0,832
14	1	0,844
11	3	0,886
13	2	0,895
15	1	0,903
10	4	0,928
12	3	0,945
16	1	0,955
14	2	0,958
13	3	0,971

Continua

(Conclusão)

Ângulo de atrito efetivo (ϕ')	Coesão efetiva (c')	Fator de segurança (FS)
11	4	0,991
17	1	1,010
15	2	1,012

Fonte: O autor.

Tendo em vista esses resultados, observa-se a complexidade deste tipo de análise ao comparar os fatores de segurança obtidos para este talude. Com um mesmo ângulo de atrito de 10° , quando a coesão efetiva aumenta de 1 kPa para 4 kPa o fator de segurança sofre um aumento de 47,5%, saindo de 0,629 para 0,928. Além disso, também é perceptível um aumento do fator de segurança para variações do ângulo de atrito efetivo, com um aumento de aproximadamente 65% no fator de segurança quando o ângulo de atrito varia de 10° para 17° .

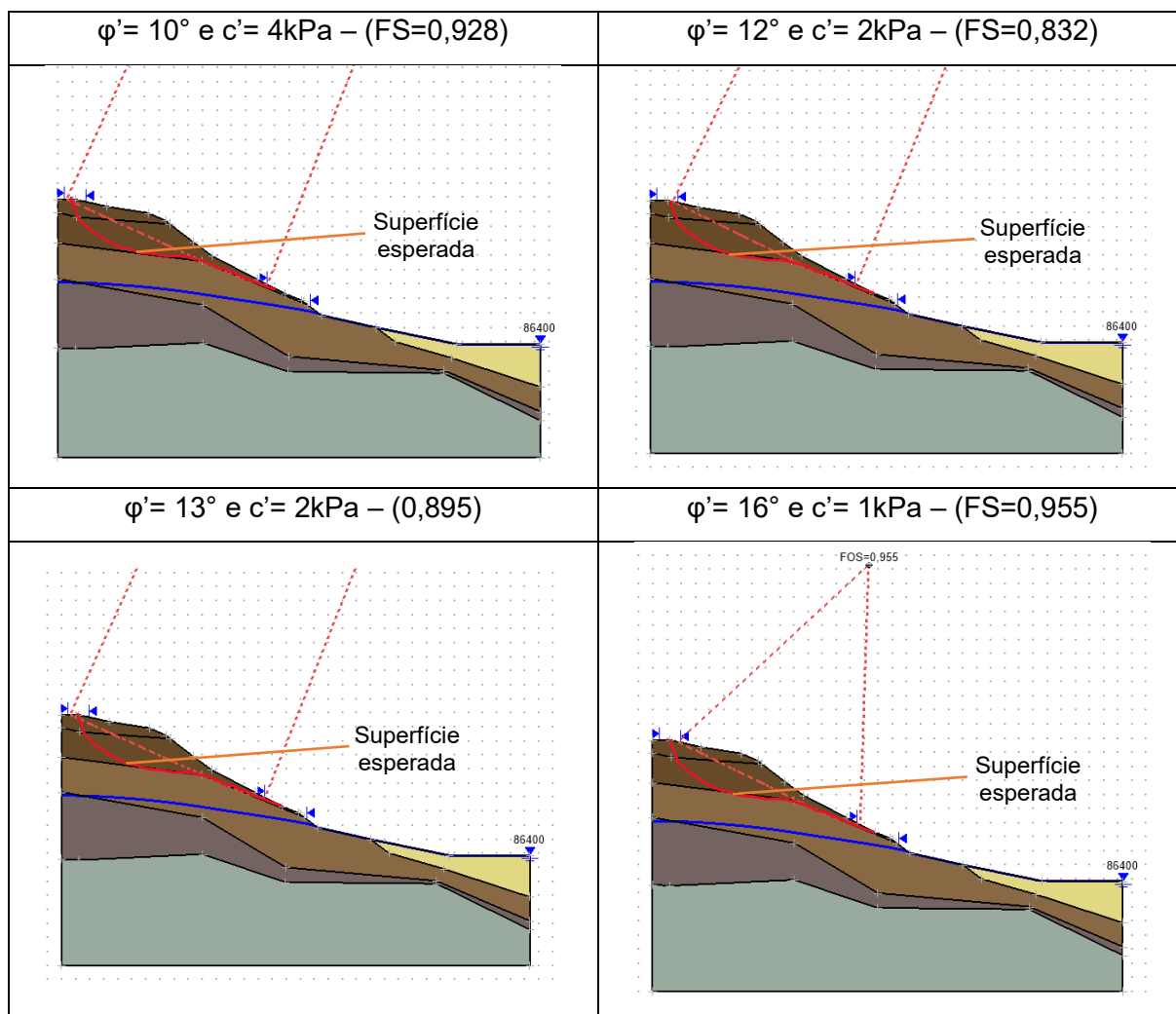
É visível que comparar estes valores entre si partindo somente destes dados não é suficiente para definir a influência de cada parâmetro de resistência no FS, mas fica claro que é fundamental defini-los de forma correta para garantir a segurança do maciço. Além disso, essa influência não é um aspecto geral, podendo oscilar em outros intervalos de parâmetros de resistência.

Como apresentado na seção anterior, para avaliar qual par de valores é o mais representativo frente às diversas incógnitas que o método pode avaliar simultaneamente, a função desenvolvida avalia tanto o fator de segurança quando a distância da superfície crítica em relação à superfície real.

Dessa maneira, se tratando da superfície crítica gerada, para os pares de valores de parâmetros de resistência de solo listados na tabela anterior, todas as superfícies demonstraram grande semelhança, variando com maior significância apenas o centro de rotação. Tal condição tornou esse critério inconclusivo no momento da definição do par de valores mais representativo.

A fim de demonstrar a condição constatada, alguns exemplos de superfícies geradas podem ser vistos na Figura 38, contemplando alguns dos pares de valores da tabela anterior. Nela, além da superfície gerada pela retroanálise também está colocada a superfície esperada, o que permitiu visualizar uma maior disparidade entre as superfícies na região de maior concavidade da superfície de campo. A superfície gerada na retroanálise demonstrou um formato mais retificado, sendo esse um comportamento típico das superfícies de ruptura geradas pelo software.

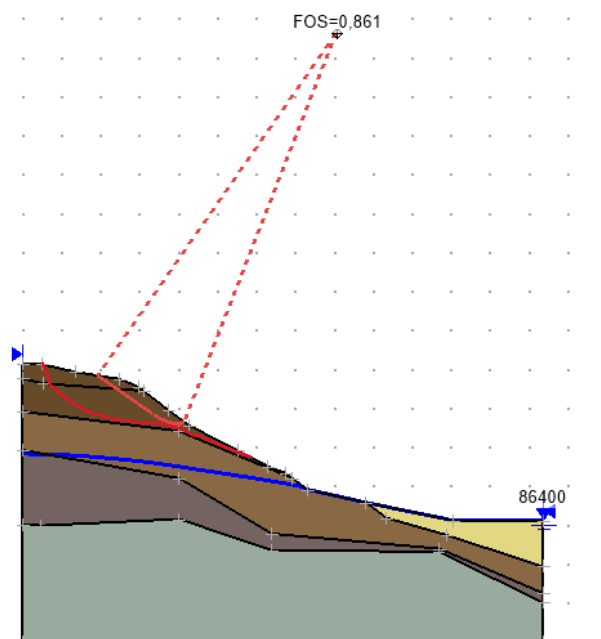
Figura 38 – Superfícies críticas geradas pelo método de Oliveira (2024).



Fonte: O autor.

Tal comportamento pode se dar pelo fato de que, ao remover os limites de início e fim das superfícies de ruptura, a superfície de ruptura que o PLAXIS LE encontra fica situada na região do talude delimitada pelo trecho entre 10 e 25 metros do eixo X (Figura 39). Por isso, ao aplicar estes limites e forçar a superfície de ruptura a passar em outra região que seria mais condizente com a região de ruptura observada em campo, o software gera essa retificação a fim de buscar uma maior aproximação com a superfície “mais crítica” do software.

Figura 39 – Superfície crítica obtida sem uso de limites de entrada e saída.



Fonte: O autor.

Essa divergência entre a superfície observada em campo e a superfície mais crítica do software, pode ser um indício da influência de outros fatores não considerados nessa retroanálise, como a geometria do talude de forma tridimensional, vegetação superficial (atuando na contenção do talude na região de ruptura simulada pelo PLAXIS LE) e possíveis degradações na crista do talude devido à qualidade de execução da via existente naquele local.

Carvalho *et al.* (2015) destaca essas influências da vegetação na resistência do solo, devido à presença das raízes que podem reforçar mecanicamente o solo. Além disso, há também certa proteção do impacto direto da chuva e aumento da evapotranspiração, se comparado a um cenário em que houvesse apenas a interação solo-atmosfera.

Por conta de tais fatores não considerados, os limites de entrada e saída para as superfícies de ruptura no software se fazem necessários para analisar a estabilidade não só no caso mais crítico, mas também no cenário mais próximo do observado em campo.

Dessa forma, o critério para definir o par de valores mais representativo foi encontrar o fator de segurança que mais se aproximou de 1 e que foi calculado partindo dos valores de coesão e ângulo de atrito efetivos mais próximos

dos obtidos de ensaios de laboratório. Nesse sentido, para esta aplicação foi estabelecido que a coesão efetiva de 1 kPa e o ângulo de atrito efetivo de 16° são os valores finais desta retroanálise.

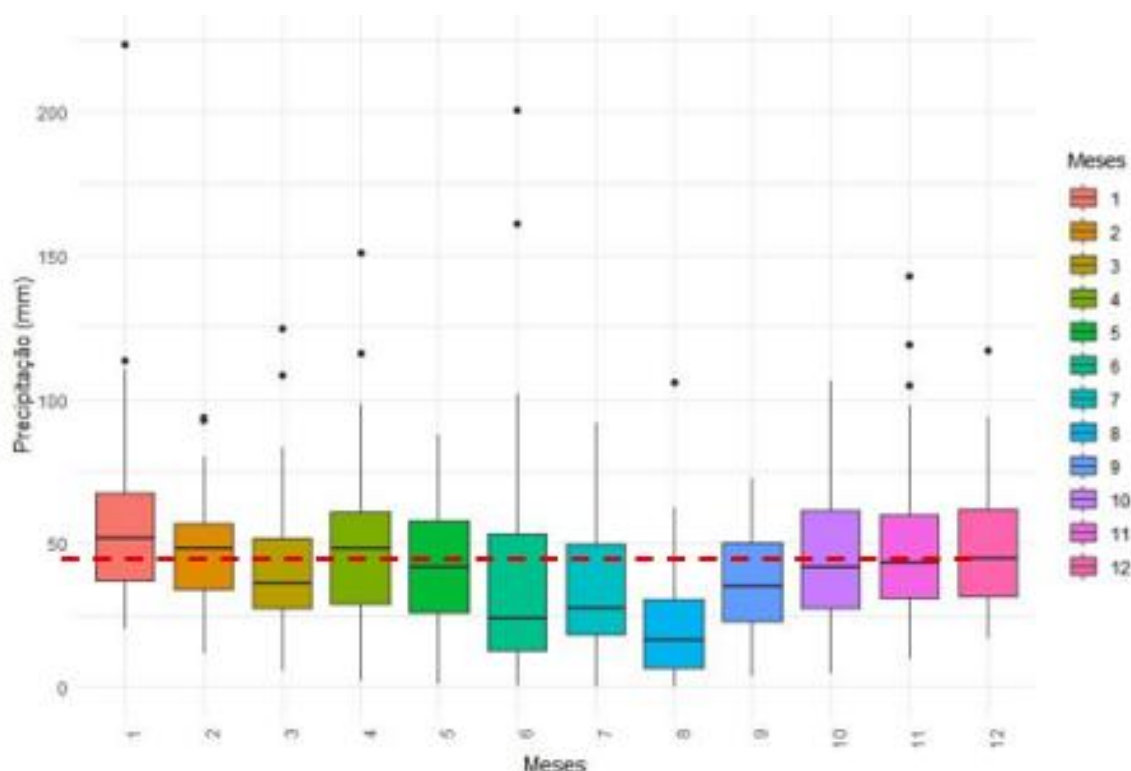
6.1.1 Fase 2 de análise de poropressão

Como citado anteriormente, a análise apresentada tomou como base o trabalho desenvolvido por Pelaquim (2021) para definir a condição de poropressão do talude no momento da ruptura, tendo em vista que a autora desenvolveu essa análise de comportamento hidráulico para esse mesmo colapso deste talude considerando um longo período de chuvas. No entanto, uma segunda hipótese de distribuição de poropressão foi aplicada no método de Oliveira, buscando verificar a influência de uma diferente distribuição de poropressão na superfície de ruptura gerada pelo software.

Sendo assim, essa segunda hipótese de poropressão não será aplicada como um cenário geral nas retroanálises do talude, mas sim como um parâmetro comparativo das superfícies de ruptura obtidas pelo método de Oliveira para, a fim de verificar se há influência dessa distribuição em seu formato considerando os pares de valores com FS menor que 1 obtidos por essa metodologia.

Dessa maneira, esta segunda hipótese de análise consiste em adotar uma porcentagem da chuva mensal registrada no mês em que houve a ruptura (dezembro de 2009), baseando-se no Gráfico 1 que agrupa a base de dados de pluviometria diária de uma estação pluviométrica da região de Londrina, que registrou dados de 1976 a 2016.

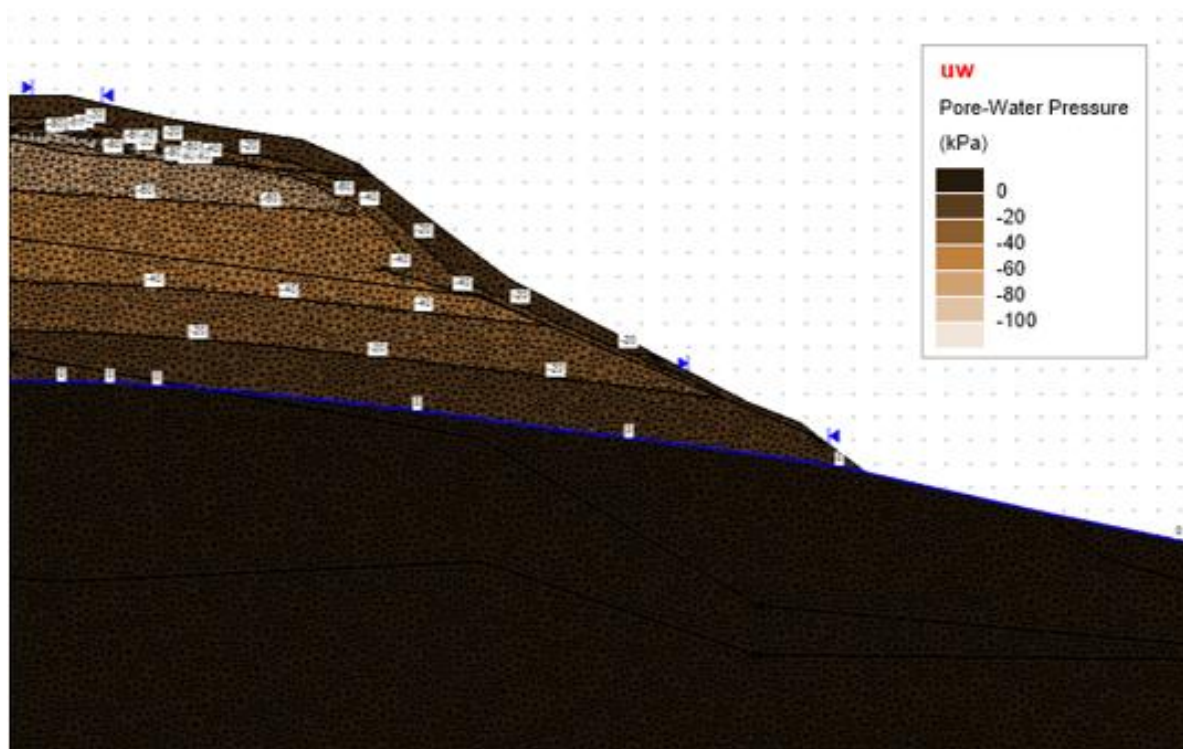
Gráfico 1 - Precipitações diárias anual para cada um dos meses, indicando a mediana do mês de dezembro.



Fonte: Leite (2022).

A partir deste gráfico, observa-se uma mediana para o mês de dezembro se encontra em torno de 45mm. Por conta disso, adotou-se uma precipitação de 73mm ocorrendo no mesmo período fixado de 24 horas, para que essa nova hipótese tenha um volume de chuvas atípico. Tal condição partiu do pressuposto que a chuva necessária para o colapso do maciço deveria representar um evento de alta intensidade, empregando então este valor que também corresponde a cerca de 30% do volume total registrado naquele mês, conforme visto anteriormente na Figura 34. Nesse sentido, a Figura 40 apresenta a distribuição de poropressão obtida para esta precipitação estimada.

Figura 40 – Distribuição da poropressão com chuva estimada.

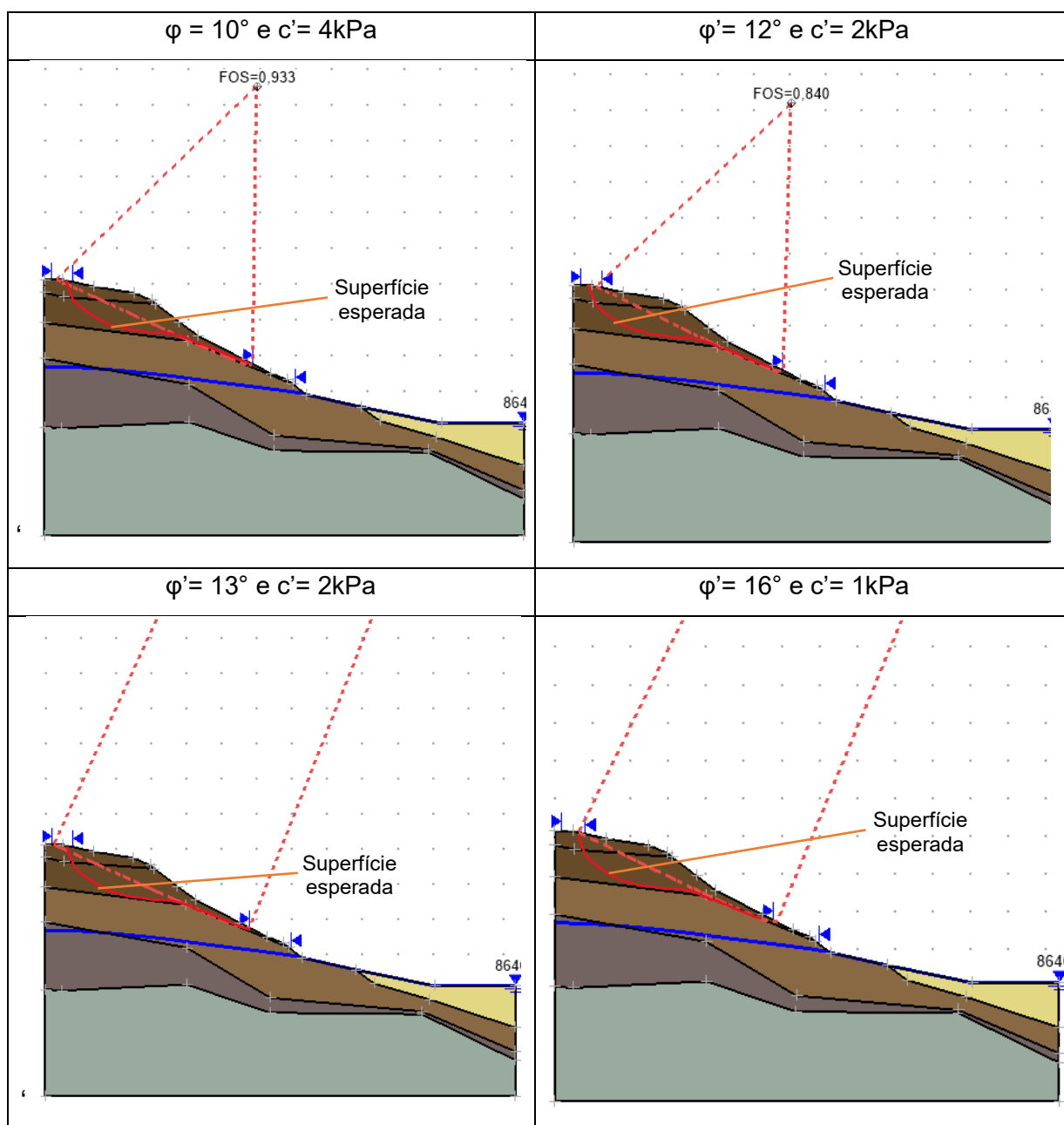


Fonte: O autor.

A nova distribuição da poropressão apresentou maiores valores de sucção, com sucção máxima em torno de -80 kPa se concentrando na região da crista do talude, o que era esperado já que o volume de chuva adotado foi menor que o volume necessário se obter a primeira hipótese de poropressão, que se aproximava dos resultados de Pelaquim (2021). Vale ressaltar que tais diferenças não invalida o estudo da autora nem os resultados apresentados para esta hipótese inicial, apenas demonstra a complexidade de se considerar a não saturação do solo sem que haja um controle de campo para aferição da sucção.

A partir desta, algumas análises de estabilidade foram realizadas, partindo de alguns dos pares de valores que geraram FS menor que 1 sob a primeira condição de poropressão. Os resultados de superfície de ruptura geradas e fator de segurança estão colocados na Figura 41.

Figura 41 – Superfícies críticas geradas pelo método de Oliveira (2024) na segunda hipótese de distribuição de poropressão do talude.



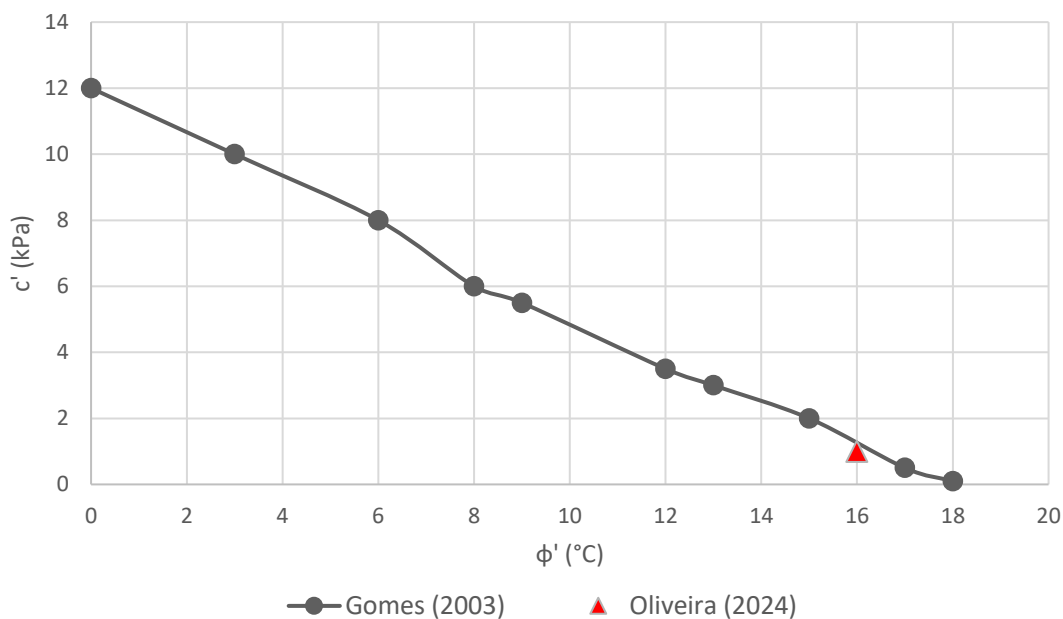
Fonte: O autor.

Como pode ser observado, o comportamento da superfície de ruptura demonstrou grande similaridade em ambas as hipóteses de poropressão para este talude, com pontos de início e fim da superfície similares à condição esperada, mas pouco abaulamento para formar a curvatura vista na superfície identificada em campo. Esse aspecto indica novamente a possibilidade de ação de algum fator não considerado nesta análise durante o evento de ruptura.

6.2 Método de Gomes (2003)

Seguindo a metodologia proposta pelo método de retroanálise desse autor, primeiramente foi desenvolvido a curva $c' \times \phi'$ para o talude a ser retroanalisado (Gráfico 2), a qual parte da superfície de ruptura pré-estabelecida (Figura 37) para determinar os pares de valores em que o fator de segurança (FS) é igual 1.

Gráfico 2 - Curva coesão efetiva x ângulo de atrito efetivo.



Fonte: O autor.

Ao observar a curva obtida e o ponto em destaque da metodologia de Oliveira, que corresponde ao par de valores final da retroanálise ($\phi'=16^\circ$ e $c'=1\text{kPa}$), nota-se que há uma convergência entre os dados, pois a metodologia de retroanálise anterior está contida na curva.

Agora, em função desta curva obtida, alguns pares de valores para ângulo de atrito efetivo e coesão efetiva são aplicados no PLAXIS LE. Nesta retroanálise, buscando contemplar toda a extensão da curva foi estabelecido o grupo de parâmetros de resistência que será apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros de resistência testados para o método de Gomes (2003).

Ângulo de atrito efetivo φ' (°)	Coesão efetiva c' (kPa)
0	12
3	10
6	8
8	6
9	5,5
12	3,5
13	3
15	2
17	0,5
18	0,1
19	0,01**

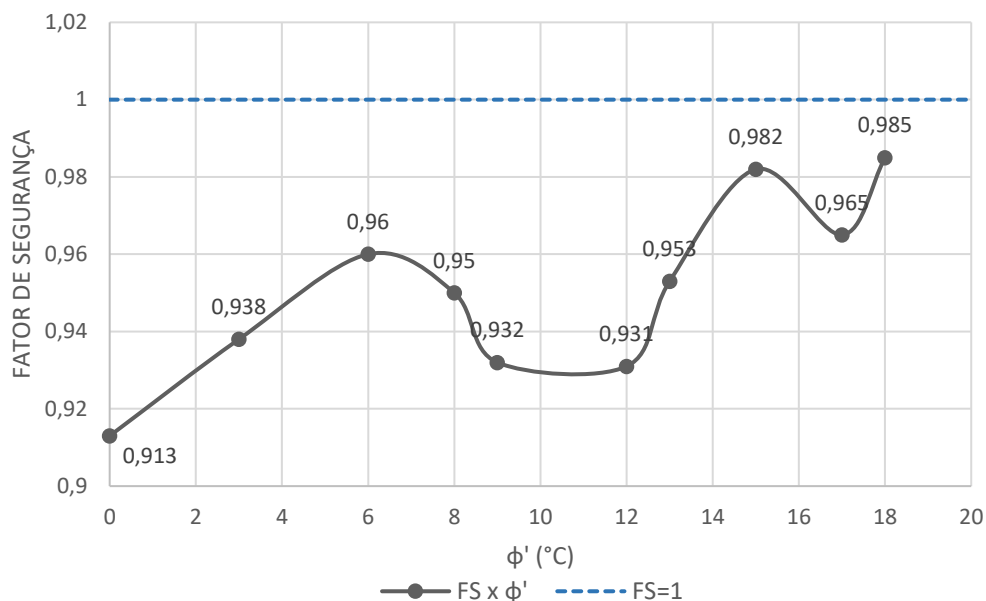
** : valor de coesão especificado para a condição $c'=0$.

Fonte: O autor.

A partir desta tabela, fica clara a tendência de redução da coesão conforme o ângulo de atrito aumenta, o que é um comportamento típico nessa condição em que se fixa um fator de segurança, nesse caso $FS=1$. Além disso, esse comportamento demonstra que não há um único resultado possível de parâmetros de resistência na iminência de ruptura ($FS=1$), mas sim um conjunto de possibilidades.

O próximo passo desta metodologia corresponde a busca da superfície crítica mais representativa deste evento de ruptura. Para isso, foi necessário determinar o fator de segurança que o talude apresenta para cada um dos pares de valores colocados na tabela anterior e representar isso de forma gráfica. Com isso, obteve-se os resultados exibidos no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Fatores de segurança obtido do método de Gomes (2003).



Segundo Gomes (2003), neste método deve-se escolher como valor final aquele que mais se aproxima do valor de fator de segurança unitário. Assim sendo, o fator de segurança mais próximo de 1 foi obtido a partir de uma coesão efetiva de 0,1 kPa e um ângulo de atrito efetivo de 18° , tornando esse o par de valores a ser escolhido como mais representativo desta retroanálise.

A metodologia se baseia na definição de uma curva que contenha os valores de resistência do solo em que FS é menor ou igual a 1, e a partir dela, são definidos os valores aplicados no software de estabilidade. Logo, é importante ressaltar que isso torna a metodologia menos objetiva, pois este não é o único par de valores que poderia representar essa instabilidade do maciço, visto que outros valores que podem ser testados geram superfícies e fatores de segurança similares.

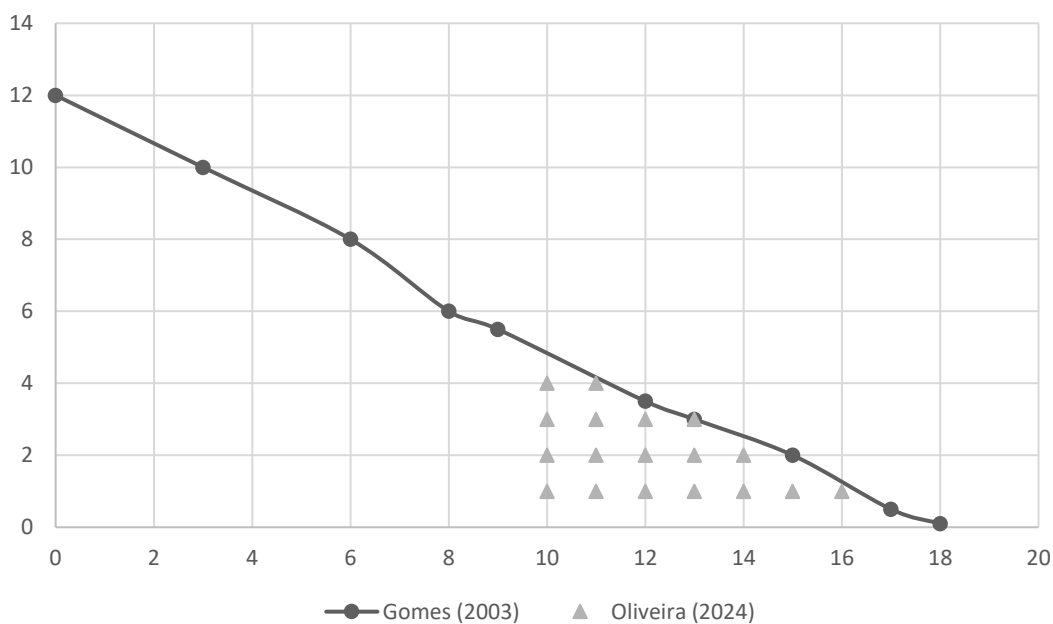
Com o par de valores de resistência da camada retroanalizada definido, a Figura 42 apresenta a superfície crítica resultante, para que possa ser avaliado se a condição esperada foi atendida. Nela, foram destacadas também a superfície de ruptura gerada pelo par de valores de parâmetros de resistência finais da retroanálise e a superfície observada em campo.

(2025), pode não representar de forma fiel a trajetória da superfície de ruptura, pois deslocamento laterais que afetam o plano de ruptura não são considerados.

6.3 Análise comparativa dos parâmetros de resistência do solo

Referente aos parâmetros de resistência do solo, uma análise comparativa é importante para avaliar o desempenho do método proposto por Oliveira (2024), tanto frente a outras metodologias de retroanálise, quanto frente a resultados experimentais para definição dos parâmetros de resistência do solo. Ao trazer os dados da Tabela 6 que possui os pares de valores com FS menor que 1 da metodologia de oliveira, para a curva coesão efetiva x ângulo de atrito efetivo do método de Gomes, tem-se o gráfico 4.

Gráfico 4 – Curva coesão efetiva x ângulo de atrito efetivo com dados das duas metodologias de retroanálise.



Fonte: O autor.

Como pode ser observado, há uma tendência dos valores do método de Oliveira se aproximarem da curva, além de possuir mais de um ponto praticamente se incorporando a ela. Com isso, fica visível que não há uma resposta exata para esse tipo de análise, tornando essa análise complexa. Logo, os resultados obtidos não são

absolutos, o que torna as diferenças entre valores de parâmetros de resistência algo esperado.

Portanto, a Tabela 8 apresenta os resultados de ambas as retroanálises e os valores obtidos em laboratório por Pelaquim (2021) para o solo em questão.

Tabela 8 – Parâmetros de resistência do solo obtidos de retroanálises e ensaios.

Fonte	Ângulo de atrito efetivo ϕ' (°)	Coesão efetiva c' (kPa)
Método de Oliveira (2024)	16	1
Método de Gomes (2003)	18	0,1
Ensaio de laboratório	23	3,2

Fonte: O autor.

É válido ressaltar que os dados de laboratório podem e devem ser tomados como referência para comparações, mas não incorporam toda a complexidade do maciço no momento da ruptura, pois este dado se reduz a uma pequena amostra de um material heterogêneo e complexo. Além disso, as incertezas na sucção do talude podem estar agregando volume a essas diferenças.

Logo, tendo em vista tais valores, observa-se pelas diferenças relativas dos valores que o método de Gomes (2003) teve uma maior proximidade com os resultados de laboratório em termos de ângulo de atrito efetivo, com um valor 22% menor que o dado de laboratório enquanto o método de Oliveira obteve uma redução de aproximadamente 31%. Já em termos de coesão efetiva o método de Oliveira (2024) ao comparar com o valor obtido de laboratório nota-se uma redução de 68%, enquanto o método de Gomes reduz quase 100%.

Dessa maneira, é importante não limitar uma retroanálise apenas aos resultados de parâmetros de resistência, uma vez que ambas as metodologias obtiveram dados similares entre si e, em termos de valores absolutos para a estabilidade do talude, uma variação de 2° e 0,9kPa nos parâmetros de resistência das retroanálises não deve demonstrar grande influência no fator de segurança para este caso em estudo. Por conta disso, ao incorporar o comportamento da superfície de ruptura na discussão, a metodologia de Gomes (2003) apresenta maior convergência com o evento de colapso em estudo (como visto na (Figura 42), tornando-o mais representativo para a análise deste estudo.

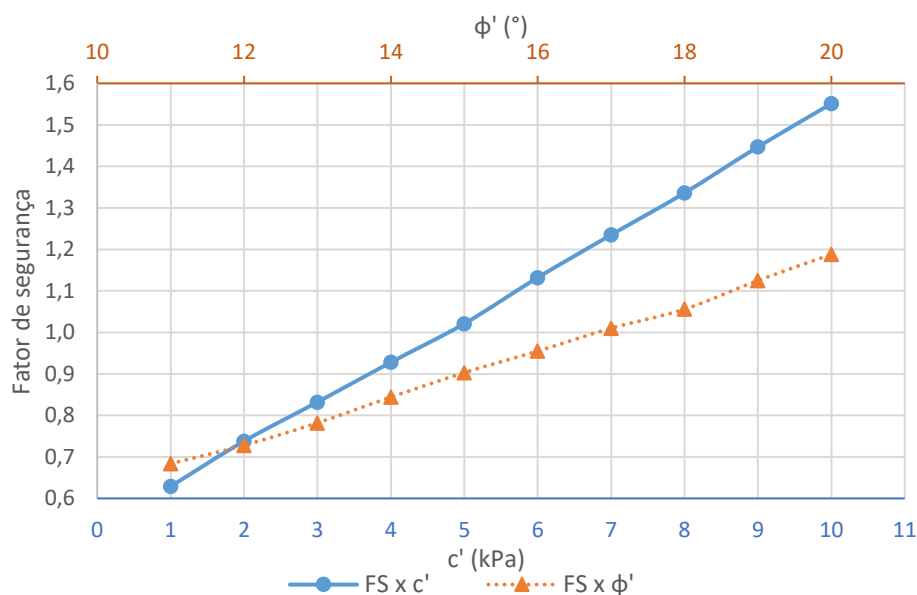
Ainda se tratando deste contraste de dados de simulações e laboratório, essas discrepâncias também foram observadas por Mattos (2010), o qual constatou que tais diferenças foram mais significativas quando os dados de laboratório são produto do ensaio de cisalhamento direto (que foi o ensaio utilizado neste trabalho). Essas diferenças foram menores quando se realizou ensaios triaxiais, já que esse não impõe um plano de ruptura na amostra, indicando que o ensaio de cisalhamento direto pode não ser uma opção de ensaio representativa em casos de análise de estabilidade de taludes para solos semelhantes ao do autor, com intensa anisotropia e planos de fraqueza em sua geometria.

A metodologia proposta por Oliveira (2024), por sua ampla aplicabilidade em diferentes situações que um talude pode apresentar, como retroanálises de taludes 3D, com ou sem saturação do solo e com possível heterogeneidade do talude, torna necessário um maior volume de testes a serem realizados, mesmo demonstrando neste estudo resultados menos convergentes com ensaios de laboratório.

Além disso, outros testes em taludes reais ainda precisam ser efetuados para se obter conclusões concretas sobre a efetividade do método de Oliveira (2024), buscando contemplar outras possibilidades para essa mesma condição de talude não homogêneo e não saturado, como solos de diferente composição e outras geometrias para o maciço.

Por fim, os dados obtidos pelo método de Oliveira (2024) ainda permitem observar a influência da variação dos parâmetros de resistência do solo no fator de segurança calculado. O Gráfico 5 apresenta como cada um dos parâmetros de resistência do solo influenciam neste fator, considerando em ambas as curvas um mesmo cenário de variação unitária destes parâmetros de resistência.

Gráfico 5 –Fator de segurança x variações dos parâmetros de resistência do solo.



Fonte: O autor.

O gráfico demonstra que, para um intervalo de tamanho equivalente e de variação unitária em ambas as curvas, a curva $FS \times c'$ possui uma inclinação mais acentuada, o que significa que a variação da coesão efetiva do solo foi mais influente no fator de segurança que o talude apresenta. Este comportamento, aliado ao que foi apresentado por Furman e Faro (2019) que destacou a maior ação das variações na sucção sobre o valor medido de coesão aparente, salienta como taludes e encostas, podem permanecer estáveis mesmo apresentando fator de segurança menor ou igual a 1 em uma análise considerando tais taludes saturados.

Carvalho et al. (2015) também apresenta situações em que variações baixas na sucção do solo (cerca de 1 kPa) já podem ser suficientes para causar variações no fator de segurança de encostas, as quais podem gerar até 20% de acréscimo. Esse crescimento da coesão aparente ocasionado pela redução no grau de saturação do solo (ou aumento da sucção matricial), foi constatado em solos residuais com um formato não linear, até que seja atingido um limite no grau de saturação em que esse crescimento se estabiliza. Tal limite tem possível relação com o limite de contração do solo.

Esse comportamento, visto principalmente em solos lateríticos, destaca a necessidade de realizar um monitoramento eficaz desse parâmetro, principalmente em situações que os danos materiais e a vidas humanas são altos caso haja uma ruptura do talude.

7 CONCLUSÕES

A retroanálise deste talude por meio de duas metodologias propostas, considerado o material não saturado, demonstrou a importância deste tipo de análise em um evento de colapso e ressaltou a complexidade de agregar essa condição de não saturação do material em uma análise de estabilidade. A retroanálise se apresentou como uma eficiente ferramenta para compreender os fatores que acarretam a ruptura de um maciço de solo, tornando o desenvolvimento de metodologias para essa análise uma importante condição para que esse tipo de análise de um material complexo seja mais assertiva.

Como a catalogação de dados e amostras de campo deste talude retroanalisado contemplou registros fotográficos, sondagens, levantamentos topográficos e análises em laboratório de amostras de solo que compõem o talude, notou-se que as amostras ensaiadas e as sondagens foram fundamentais para compreender a geometria e comportamento do maciço.

Estimar a distribuição de poropressão no talude a partir de dados pluviométricos é importante para compreender o efeito da infiltração no maciço no solo, além de abrir espaço para compreender como a intensidade de precipitação afeta a sucção matricial do solo não saturado e, conseqüentemente, o fator de segurança do talude. Como foi observado por diversos autores, variações de sucção afetam significativamente a coesão aparente de solos residuais, gerando em um mesmo talude maior segurança em períodos mais secos e possíveis rupturas em períodos com maiores índices de pluviosidade.

Em termos de comparação das duas metodologias aplicadas no talude, nestas retroanálises o método de Gomes (2003) se mostrou mais condizente quando comparado com a situação de campo, tanto no formato que a superfície de ruptura gerada demonstrou quanto na proximidade dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, principalmente em termos de ângulo de atrito efetivo.

A metodologia de Oliveira (2024), mesmo com resultados mais distantes dos parâmetros de resistência obtidos em laboratório, ainda deve ser testada em outras condições e avaliando outros casos reais, com outros tipos de solo, geometria e saturação, visto que a autora apresenta um método de ampla aplicabilidade e estas precisam ser avaliadas para que seja possível obter conclusões concretas sobre sua efetividade.

Além disso, divergências entre retroanálise e laboratório também foram notadas por Mattos (2010) ao fazer esse comparativo de parâmetros de resistência do solo, evidenciando-as com mais intensidade principalmente quando o ensaio de laboratório se tratava de um ensaio de cisalhamento direto, que foi justamente o ensaio deste estudo. Tais discrepâncias se devem a imposição de um plano de ruptura no ensaio de cisalhamento direto, o que em solos de maior anisotropia pode forçar a ruptura do solo em um plano que não seria necessariamente é o mais crítico.

Ainda assim, o maior volume de dados obtidos pelo método e Oliveira (2024) permitiu verificar a grande influência que a coesão possui sobre o fator de segurança calculado neste estudo, um comportamento também identificado por outros autores devido à variação da sucção matricial em um solo não saturado. Essa propriedade ressalta a importância da consideração correta desse valor e a complexidade de se analisar um talude nesta condição de saturação, principalmente quando não há dados de campo como foi visto nesse trabalho. Portanto, nota-se a necessidade de se realizar um monitoramento eficiente das variações de sucção em maciços de grande porte, principalmente em casos que a ruptura do maciço pode acarretar grandes danos materiais e a vidas humanas.

8 TÓPICOS PARA ESTUDOS FUTUROS

Visando abordar melhor a complexidade de retroanálises de taludes, principalmente envolvendo a condição não saturada, e desenvolver outros estudos com este método recente de proposto por Oliveira (2024), alguns tópicos de estudos serão sugeridos a seguir.

- Aplicação da metodologia de Oliveira (2024) em análises tridimensionais de taludes reais;
- Trabalhar com a metodologia de Oliveira (2024) em outros taludes reais, aplicando o código desenvolvido pela autora no PLAXIS LE;
- Neste contexto de retroanálises de taludes, comparar resultados de análises determinísticas e probabilísticas;
- Retroanalisar taludes não saturados a partir de aferições de sucção em campo, comparando os resultados com o cenário em que não é feita essa consideração de solo não saturado.

REFERÊNCIAS

ABHINAV, Anshu; BASER, Tugce. Undrained shear strength of frozen unsaturated silts. In: **E3S Web of Conferences**. EDP Sciences, 2023. p. 06001.

ABNT. NBR 11682 - Estabilidade de Encostas. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. Rio de Janeiro, 2009.

ALVARADO-FRANCO, Juan Pablo et al. Quantitative-mechanistic model for assessing landslide probability and pipeline failure probability due to landslides. **Engineering Geology**, v. 222, p. 212-224, 2017.

ANTUNES, I. S de Lima. et al. Análise da estabilidade de taludes através de métodos rigorosos e não rigorosos. **Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências (CONAPESC)**, Campina Grande, 2018.

DE ARAÚJO, Daniel Miranda Ramos et al. Avaliação da estabilidade de taludes em áreas de expansão urbana do município de Rio Piracicaba-MG, Brasil. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 8, n. 2, p. 50-68, 2021.

BAI, Tao; HU, Xiaodi; GU, Fan. Practice of searching a noncircular critical slip surface in a slope with soil variability. **International Journal of Geomechanics**, v. 19, n. 3, p. 04018199, 2019.

BUDHU, M. **Soil mechanics and foundation**. 3. ed. Nova York: John Wiley e Sons, 2000.

CARVALHO, José Camapum de et al. Solos não saturados no contexto geotécnico. **São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, 2015.

CHEN, Pan et al. Strength theory model of unsaturated soils with suction stress concept. **Journal of Applied Mathematics**, v. 2013, n. 1, p. 756854, 2013.

CHEN, Yulong et al. Shear deformation and failure of unsaturated sandy soils in surface layers of slopes during rainwater infiltration. **Measurement**, v. 149, p. 107001, 2020.

CHENG, Hao et al. Stability analysis of unsaturated–saturated soil slopes under rainfall infiltration using the rigorous limit equilibrium method. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 83, n. 4, p. 147, 2024.

CIVIDINI, Annamaria; JURINA, Lorenzo; GIODA, Giancarlo. Some aspects of ‘characterization’ problems in geomechanics. In: **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**. Pergamon, 1981. p. 487-503.

DESCHAMPS, Rick; YANKEY, Greg. Limitations in the back-analysis of strength from failures. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 132, n. 4, p. 532-536, 2006.

DUNCAN, J. Michael; WRIGHT, Stephen G. The accuracy of equilibrium methods of slope stability analysis. **Engineering geology**, v. 16, n. 1-2, p. 5-17, 1980.

DYSON, Ashley P.; TOLOOIYAN, Ali. Comparative approaches to probabilistic finite element methods for slope stability analysis. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 100, p. 102061, 2020.

FREDLUND, Delwyn G.; KRAHN, J. Comparison of slope stability methods of analysis. **Canadian geotechnical journal**, v. 14, n. 3, p. 429-439, 1976.

FREDLUND, Delwyn G. Unsaturated soil mechanics in engineering practice. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 132, n. 3, p. 286-321, 2006.

FURMAN, J.; FARO, V. P. Parâmetros de resistência de um solo não saturado da região da Serra do Mar-trecho PR-SP. **XIII Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul (GEOSUL)**, Santa Catarina, p. 1–8, 2019.

GARCIA-FERIA, Mauricio; COLMENARES, Julio E. Back-Analysis of an Infinite Unsaturated Soil Slope Using a Bayesian Framework. In: **Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges**. IOS Press, 2019. p. 708-715.

GERSCOVICH, Denise MS. **Estabilidade de Taludes (2ª edição)**. Oficina de textos, 2016.

GONÇALVES, Flávia et al. Caracterização Físico-química e mineralógica de três solos do estado do Paraná. In: **XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica—COBRAMSEG**. 2018.

HAMEDIFAR, Hamed et al. Role of probabilistic methods in sustainable geotechnical slope stability analysis. **Procedia Earth and Planetary Science**, v. 9, p. 132-142, 2014.

HUANG, Xiaolei; DONG, Yang. Study on physical and mechanical properties of soil in a loess landslide. In: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, 2023. p. 012010.

HULLER, Jéssica et al. Mapeamento de movimentos de massa rasos na Microbacia do Itacorubi: Mapping of shallow mass movements in the Itacorubi Watershed. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 5, n. 3, p. 3355-3366, 2022.

JIANG, Shui-Hua et al. Probabilistic back-analysis of rainfall-induced landslides for slope reliability prediction with multi-source information. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 16, n. 9, p. 3575-3594, 2024.

JESUS, Alexandre Cerqueira de. **Retroanálise de escorregamentos em solos residuais não saturados**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2008.

JUNIOR, Ailson Ribeiro Rodrigues. **Estudo de diferentes métodos de análises de estabilidade de taludes terrosos**. Universidade Federal do Pampa. Caçapava do Sul, 2015.

LEITE, L. T. **Eventos extremos de precipitação em Londrina (PR): Uma análise multidisciplinar**. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2022.

LEONG, Eng Choon; RAHARDJO, Harianto. Review of soil-water characteristic curve equations. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 123, n. 12, p. 1106-1117, 1997.

LI, Huajin et al. A revised formula to compute shear strength of unsaturated soils. **International Journal of Georesources and Environment-IJGE (formerly Int'l J of Geohazards and Environment)**, v. 3, n. 1-2, p. 47-55, 2017.

LIN, Hang; CHEN, Jingyu. Back analysis method of homogeneous slope at critical state. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 21, n. 3, p. 670-675, 2017.

LIU, Xin; WANG, Yu; LEUNG, Anthony Kwan. Probabilistic back analysis of rainfall-induced slope failure considering slope survival records from past rainfall events. **Computers and Geotechnics**, v. 159, p. 105436, 2023.

MA, Jianhua et al. Stability analysis of a loess landslide considering rainfall patterns and spatial variability of soil. **Computers and Geotechnics**, v. 167, p. 106059, 2024.

MAŁKA, Anna et al. Mass-movement causes and landslide susceptibility in river valleys of lowland areas: A case study in the central radunia valley, northern poland. **Geosciences**, v. 13, n. 9, p. 277, 2023.

MATTOS, T. B. DE. **Retroanálise de ruptura planar em talude rodoviário - BR101 rodovia Rio Santos**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

MOAYEDI, Hossein et al. Hybridizing four wise neural-metaheuristic paradigms in predicting soil shear strength. **Measurement**, v. 156, p. 107576, 2020.

MOSCATELI, D. C. **Taludes estabilizados por retroanálise – Análise crítica e comparação com métodos tradicionais de análise de equilíbrio limite**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

NASA'S SCIENTIFIC VISUALIZATION STUDIO. **Global Landslide Catalog (Update 2017)**. Disponível em: <<https://svs.gsfc.nasa.gov/4632>>. Acesso em: 4 fev. 2025.

NETO, Lucas Viterbino; FREITAS, Jeremy. Análise de estabilidade de taludes de barragens de terra. **Revista Científica Multidisciplinar do CEAP**, v. 2, n. 1, p. 10-10, 2020.

OLIVEIRA, M. R. DE. **Método de retroanálise de parâmetros de resistência ao cisalhamento em taludes**. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2024.

PANDYA, Saloni; SACHAN, Ajanta. Variation of collapse potential and stiffness degradation with matric suction of compacted unsaturated cohesive soil. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 14, n. 1, p. 35-48, 2020.

PELAQUIM, F. G. P. **Estabilidade de taludes em solo argiloso não saturado considerando o efeito da variação pluviométrica**. Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021.

PINTO, C. DE S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3° ed. São Paulo: Oficina dos textos, 2006.

QIAN, Z. G. et al. An artificial neural network approach to inhomogeneous soil slope stability predictions based on limit analysis methods. **Soils and foundations**, v. 59, n. 2, p. 556-569, 2019.

RABIE, M. Comparison study between traditional and finite element methods for slopes under heavy rainfall. **HBRC Journal**, v. 10, n. 2, p. 160-168, 2014.

RAMBO, L. H. et al. Comparação de métodos de estabilidade aplicados em modelagens bidimensionais e tridimensionais de taludes. **IX Conferência Brasileira sobre Estabilidade de encostas (COBRAE)**, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, p. 1–8, 2025.

ROGÉRIO, Paulo R. **Cálculo da estabilidade de taludes pelo Método de Bishop Simplificado**. Editora Edgard Blücher, 1977.

SALAH, Isabel Cristina et al. Soil Movements Correlation to Pluviometric Events in BR-101 Highway, in Santa Catarina, Brazil. In: **Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges**. IOS Press, 2019. p. 1741-1748.

SILVA, J. P. M. DA. **Os métodos de equilíbrio limite e dos elementos finitos na análise de estabilidade de taludes**. Universidade do Porto, Porto, 2011.

SPENCER, Ef. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. **Geotechnique**, v. 17, n. 1, p. 11-26, 1967.

SUN, Xiaoping et al. From probabilistic back analyses to probabilistic run-out predictions of landslides: a case study of Heifangtai terrace, Gansu Province, China. **Engineering geology**, v. 280, p. 105950, 2021.

TEIXEIRA, Raquel Souza; BRANCO, C. J. M. C.; SOBRINHO, V. R. M. Avaliação do Perfil Estratigráfico Obtido por meio de SPTs, CPTs e DMTs Executados em Solo Laterítico da Cidade de Londrina/PR. In: **XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Curitiba-PR**. 2006.

TEIXEIRA, W. et al. **Retroanálise da estabilidade de um talude rodoviário da região de Curitiba**. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS), Belo Horizonte, p. 9, 2016.

VANAPALLI, S. K. et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. **Canadian geotechnical journal**, v. 33, n. 3, p. 379-392, 1996.

VARNES, David J. Slope movement types and processes. **Special report**, v. 176, n. 11, p. e33, 1978.

VILAR, Orencio. Monge. **Fundamentos da Mecânica dos Solos Não Saturados**. 1. ed. São Carlos: Orencio Monje Vilar, 2018.

WANG, Chwen-Huan et al. Back-analysis of a rainfall-induced landslide case history using deterministic and random limit equilibrium methods. **Engineering Geology**, v. 317, p. 107055, 2023.

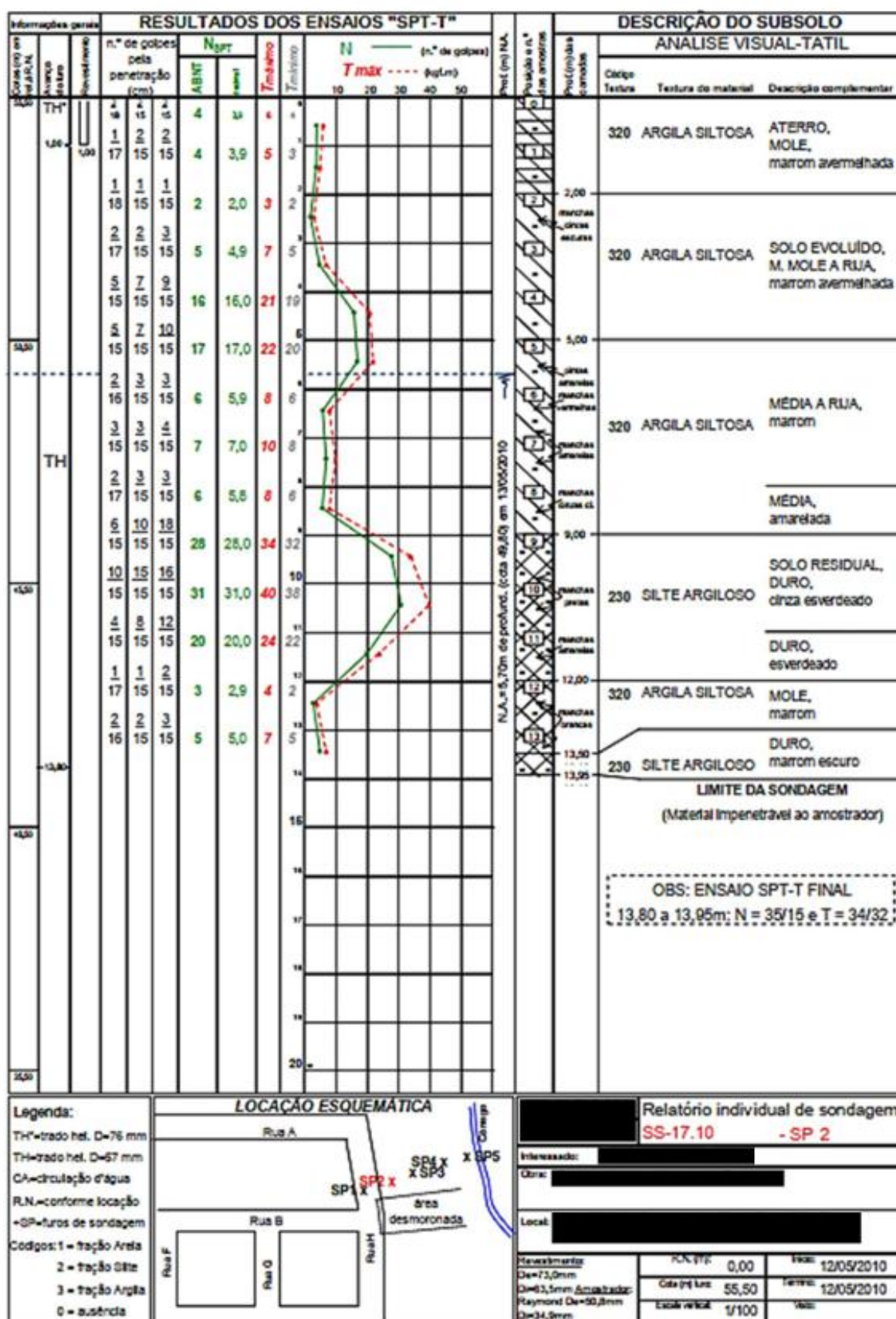
XU, Xiangzhou et al. Qualifying mass failures on loess gully sidewalls using laboratory experimentation. **Catena**, v. 187, p. 104252, 2020.

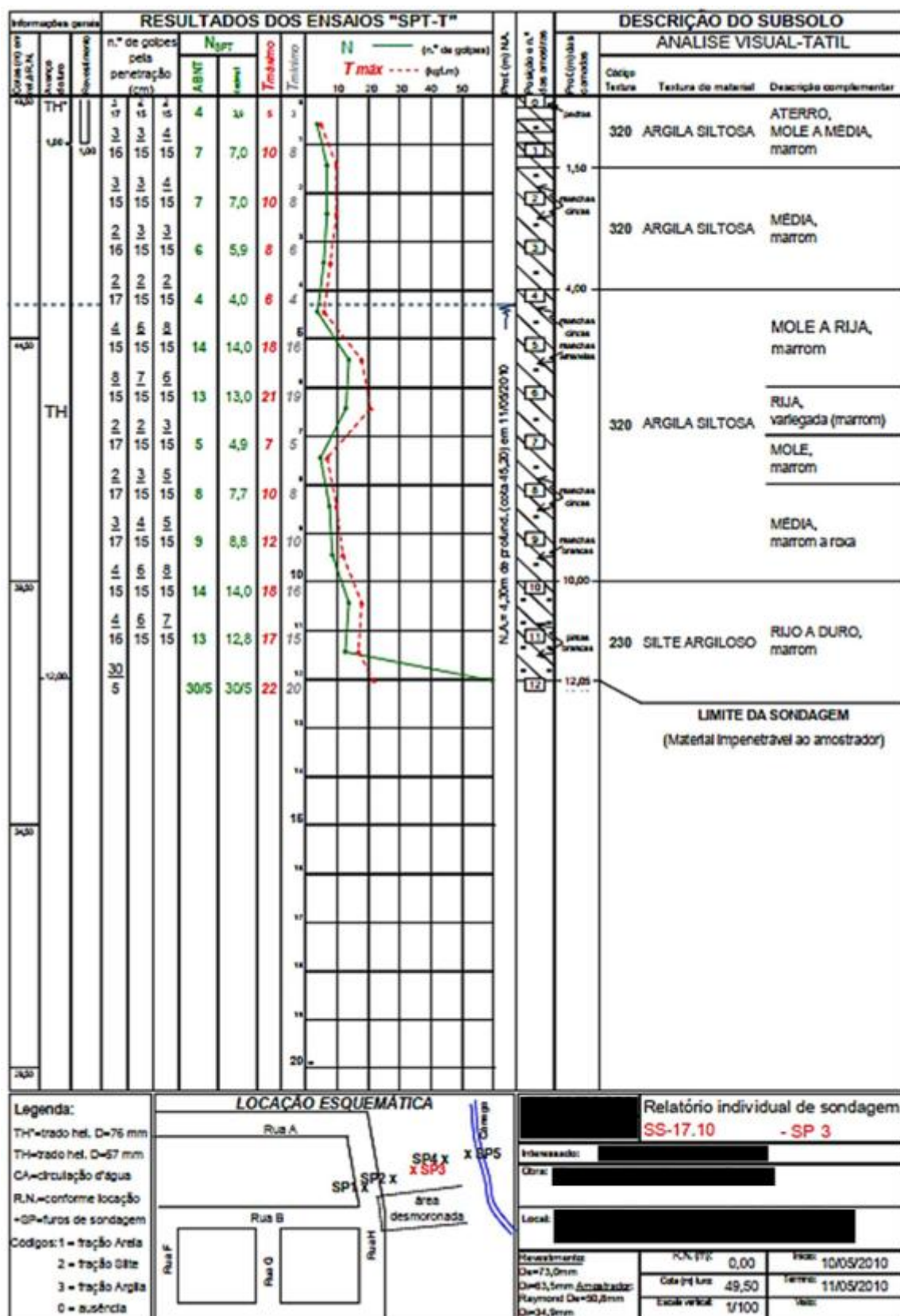
ZABOLOTNII, Elena; MORGENSTERN, Norbert R.; WILSON, G. Ward. Mechanism of failure of the mount polley tailings storage facility. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 59, n. 8, p. 1503-1518, 2022.

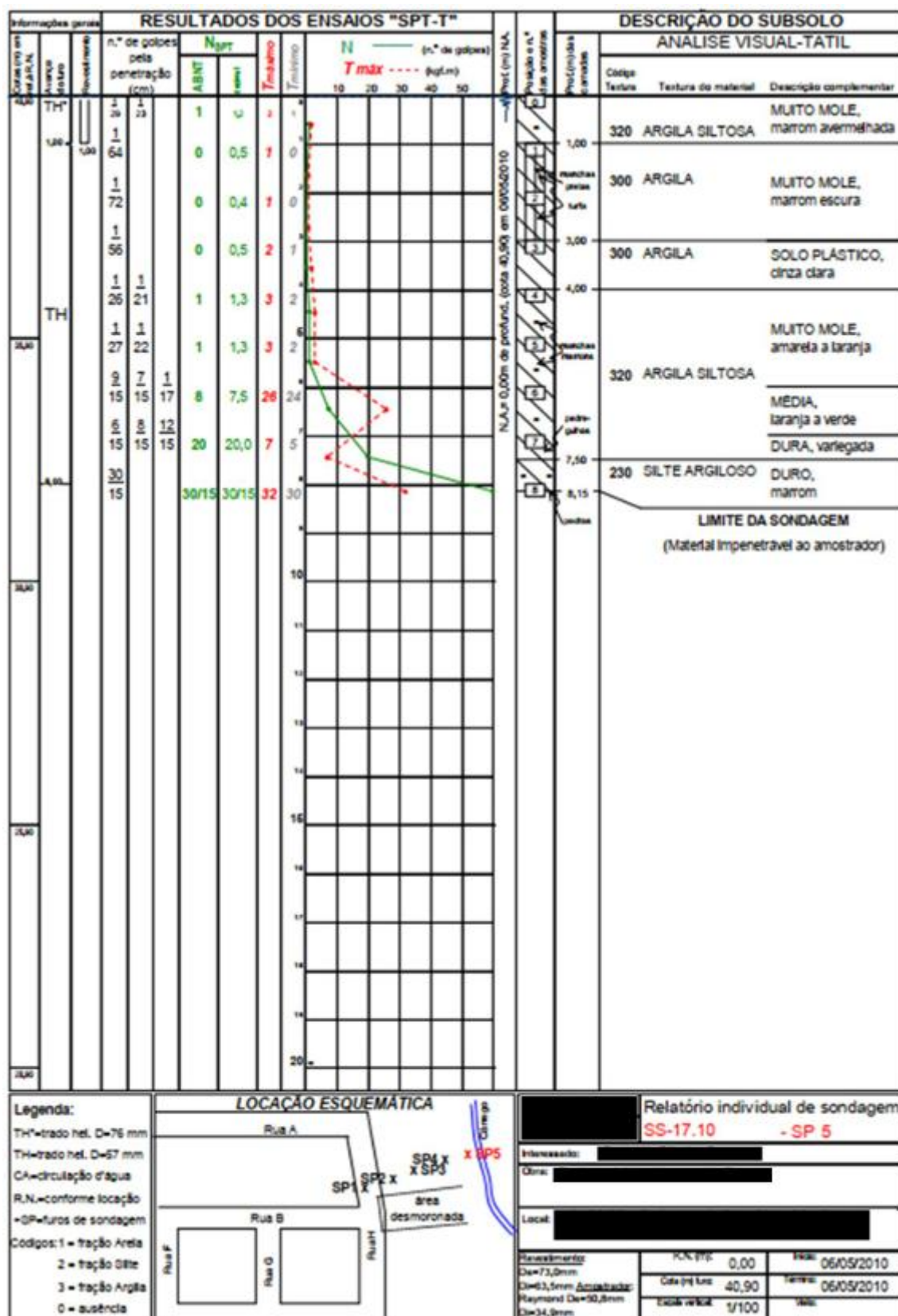
ZHANG, L. L. et al. Back analysis of slope failure with Markov chain Monte Carlo simulation. **Computers and Geotechnics**, v. 37, n. 7-8, p. 905-912, 2010.

ZHANG, J.; TANG, Wilson H.; ZHANG, Limin M. Efficient probabilistic back-analysis of slope stability model parameters. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 136, n. 1, p. 99-109, 2010.

APÊNDICES







**APÊNDICE B – TABELA COMPLETA DE RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO
MÉTODO DE RETROANÁLISE DE OLIVEIRA (2024)**

Tabela 9 – Tabela completa dos resultados obtidos da aplicação do método de Oliveira (2024)

Ângulo de atrito efetivo φ' (°)	Coesão efetiva c' (kPa)	Fator de segurança FS
10	1	0,629
10	2	0,738
10	3	0,832
10	4	0,928
10	5	1,021
10	6	1,132
10	7	1,235
10	8	1,336
10	9	1,447
10	10	1,551
11	1	0,684
11	2	0,791
11	3	0,886
11	4	0,991
11	5	1,091
11	6	1,202
11	7	1,286
11	8	1,385
11	9	1,505
11	10	1,593
12	1	0,728
12	2	0,832
12	3	0,945
12	4	1,041
12	5	1,149
12	6	1,242
12	7	1,314
12	8	1,444
12	9	1,530
12	10	1,628
13	1	0,782
13	2	0,895
13	3	0,971
13	4	1,103
13	5	1,208
13	6	1,309
13	7	1,408

(Continua)

Ângulo de atrito efetivo φ' (°)	Coesão efetiva c' (kPa)	Fator de segurança FS
13	8	1,516
13	9	1,603
13	10	1,713
14	1	0,844
14	2	0,958
14	3	1,053
14	4	1,160
14	5	1,265
14	6	1,360
14	7	1,460
14	8	1,520
14	9	1,656
14	10	1,729
15	1	0,903
15	2	1,012
15	3	1,116
15	4	1,225
15	5	1,315
15	6	1,402
15	7	1,518
15	8	1,627
15	9	1,688
15	10	1,827
16	1	0,955
16	2	1,060
16	3	1,133
16	4	1,264
16	5	1,372
16	6	1,467
16	7	1,581
16	8	1,682
16	9	1,765
16	10	1,869
17	1	1,010
17	2	1,118
17	3	1,220
17	4	1,326
17	5	1,422
17	6	1,537
17	7	1,623
17	8	1,732
17	9	1,844
17	10	1,919
18	1	1,056
18	2	1,176
18	3	1,285
18	4	1,380

(Continua)

Ângulo de atrito efetivo ϕ' (°)	Coesão efetiva c' (kPa)	Fator de segurança FS
18	5	1,485
18	6	1,598
18	7	1,641
18	8	1,791
18	9	1,885
18	10	1,914
19	1	1,125
19	2	1,238
19	3	1,342
19	4	1,445
19	5	1,524
19	6	1,638
19	7	1,723
19	8	1,857
19	9	1,947
19	10	1,979
20	1	1,188
20	2	1,298
20	3	1,394
20	4	1,489
20	5	1,589
20	6	1,726
20	7	1,782
20	8	1,889
20	9	1,962
20	10	1,968
21	1	1,241
21	2	1,347
21	3	1,462
21	4	1,568
21	5	1,654
21	6	1,752
21	7	1,858
21	8	1,949
21	9	2,021
21	10	1,982
22	1	1,296
22	2	1,408
22	3	1,521
22	4	1,620
22	5	1,715
22	6	1,843
22	7	1,911
22	8	1,913
22	9	2,021
22	10	2,020
23	1	1,367

(Continua)

Ângulo de atrito efetivo ϕ' (°)	Coesão efetiva c' (kPa)	Fator de segurança FS
23	2	1,468
23	3	1,575
23	4	1,661
23	5	1,785
23	6	1,871
23	7	1,988
23	8	1,940
23	9	1,955
23	10	1,893
24	1	1,396
24	2	1,511
24	3	1,649
24	4	1,737
24	5	1,861
24	6	1,940
24	7	1,984
24	8	1,950
24	9	2,056
24	10	2,063
25	1	1,460
25	2	1,571
25	3	1,712
25	4	1,790
25	5	1,912
25	6	1,907
25	7	1,951
25	8	1,983
25	9	2,032
25	10	2,106
26	1	1,546
26	2	1,660
26	3	1,757
26	4	1,878
26	5	1,960
26	6	1,953
26	7	2,034
26	8	1,978
26	9	1,915
26	10	2,058
27	1	1,621
27	2	1,724
27	3	1,824
27	4	1,916
27	5	1,876
27	6	2,014
27	7	2,016
27	8	2,069

(Continua)

(Conclusão)

Ângulo de atrito efetivo φ' (°)	Coesão efetiva c' (kPa)	Fator de segurança FS
27	9	1,977
27	10	1,955
28	1	1,659
28	2	1,783
28	3	1,888
28	4	1,950
28	5	1,962
28	6	1,965
28	7	1,987
28	8	2,026
28	9	1,937
28	10	2,027
29	1	1,740
29	2	1,834
29	3	1,913
29	4	1,941
29	5	2,008
29	6	2,020
29	7	2,042
29	8	1,956
29	9	2,012
29	10	2,048
30	1	1,809
30	2	1,920
30	3	1,942
30	4	2,034
30	5	1,990
30	6	1,940
30	7	2,002
30	8	2,011
30	9	2,110
30	10	2,037

Fonte: O autor.