



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas – Departamento de Engenharia  
Urbana  
Curso de Graduação em Engenharia Urbana

---



ESCOLA DE MINAS

**Ana Carla Favero Santos**

# **ANÁLISE GEOTÉCNICA E HIDROLÓGICA DA ESTABILIDADE DO TALUDE DO MORRO DA FORÇA – OURO PRETO**

Ouro Preto

2025

Ana Carla Favero Santos

Análise Geotécnica e Hidrológica da Estabilidade do Talude do Morro da Forca –  
Ouro Preto

Projeto Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Urbana na Universidade Federal de Ouro Preto. Áreas de concentração: Geotecnia e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. D.Sc. Pedro Manuel Alameda Hernandez – UFOP.

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. D.Sc. Aline de Araújo Nunes – UFOP.

Ouro Preto

2025

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S237a Santos, Ana Carla Favero.

Análise geotécnica e hidrológica da estabilidade do talude do Morro da Forca - Ouro Preto. [manuscrito] / Ana Carla Favero Santos. - 2025. 61 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Manuel Alameda Hernandez Hernandez.

Coorientadora: Profa. Dra. Aline de Araujo Nunes Nunes.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.

Escola de Minas. Graduação em Engenharia Urbana .

1. Mecânica do solo. 2. Taludes (Mecânica do solo) - Estabilidade. 3. Engenharia geotécnica. 4. Hidrologia. I. Hernandez, Pedro Manuel Alameda Hernandez. II. Nunes, Aline de Araujo Nunes. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 62:711.4

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - SIAPE: 1.763.787



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Ana Carla Favero Santos**

Análise geotécnica e hidrológica da estabilidade do talude do Morro da Força– Ouro Preto

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Urbana da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Urbano

Aprovada em 10 de abril de 2025

### Membros da banca

Dr. Pedro Manuel Alameda Hernández - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

Dra. Aline de Araújo Nunes - Coorientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)

Dr. Allan Erlikhman Medeiros dos Santos - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Eng. Leandro Cruz Cavalieri - (Defesa Civil - Ouro Preto)

Pedro Manuel Alameda Hernández, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 10/04/2025



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Manuel Alameda Hernandez, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/04/2025, às 22:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0894409** e o código CRC **4DC9E03A**.

*Dedico este trabalho aos meus pais  
e a minha irmã que sempre me apoiaram  
durante esta trajetória.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus, por me permitir realizar mais este sonho. Minha profunda gratidão ao meu orientador, Pedro Manuel Alameda Hernandez, e à minha coorientadora, Aline de Araujo Nunes, por me guiarem com dedicação ao longo desta jornada final. Aos meus familiares, minha eterna gratidão, pois sem o apoio de vocês, jamais teria chegado até aqui. Em especial, agradeço à minha mãe, Maria da Penha Favero Santos, meu exemplo de mulher forte e guerreira; ao meu pai, José Carlos dos Santos, minha referência de determinação e otimismo; e à minha irmã, Diane Favero Santos Casagrande, que sempre foi e será minha fonte de inspiração. Aos meus colegas de curso, Gabriele, Gabriel, Karol e Taline, que tornaram essa trajetória mais leve e cheia de aprendizado. Por fim, agradeço à UFOP pelo ensino gratuito e de qualidade, ao CNPq, FG e PRACE por tornarem minha formação possível.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo investigar as condições geotécnicas e hidrológicas associadas à movimentação gravitacional de massa ocorrida no Morro da Forca, em 2022. A pesquisa busca determinar o tempo de retorno da precipitação que desencadeou o deslizamento, por meio da análise de precipitações máximas diárias anuais e as precipitações máximas anuais acumuladas de uma série histórica de 32 anos, com o intuito de compreender a relação entre a intensidade das chuvas e a instabilidade do talude. Além disso, foi realizada uma retroanálise dos parâmetros geotécnicos relacionados ao momento da ruptura, empregando o método de Equilíbrio Limite com o critério de Bishop Simplificado e Janbu Simplificado. Para isso, foram realizados levantamentos de campo, com a coleta de dados geotécnicos e hidrogeológicos do local, permitindo a estimativa dos parâmetros e a modelagem da estabilidade do talude. A análise dos resultados contribui para a compreensão das condições que levaram à instabilidade, além de fornecer subsídios para o aprimoramento das avaliações de risco e a definição de estratégias de mitigação de deslizamentos na região.

Palavras-chave: Retroanálise, talude, tempo de retorno e movimentos gravitacionais de massa.

## **ABSTRACT**

This study aims to investigate the geotechnical and hydrological conditions associated with the mass gravitational movement that occurred at Morro da Forca in 2022. The research seeks to determine the return period of the precipitation that triggered the landslide, by analyzing annual maximum daily precipitations and accumulated annual maximum precipitations from a 32-year historical series, in order to understand the relationship between rainfall intensity and slope instability. Additionally, a backanalysis of the geotechnical parameters related to the rupture event was performed, employing the Limit Equilibrium method with the Simplified Bishop and Simplified Janbu criteria. For this purpose, field surveys were conducted, with the collection of geotechnical and hydrogeological data from the site, allowing for the estimation of parameters and the modeling of slope stability. The analysis of the results contributes to the understanding of the conditions that led to the instability, as well as providing insights for improving risk assessments and defining strategies for landslide mitigation in the region.

Keywords: Backanalysis, slope, return period, and gravitational mass movements.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Construções que desabaram com a movimentação de massa (Fonte: Google Maps).....	4
Figura 2 – Talude do Morro da Forca momentos após o deslizamento (Fonte: Jornal Hora do Povo, 2022) .....	5
Figura 3 - Principais tipos de deslizamentos em vertentes e estereogramas de estruturas que podem dar origem a esses deslizamentos. (Fonte: adaptado de FIORI E CARMIGNANI, 2009).....	8
Figura 4 – Representação de como a água atua em taludes de rocha. ....	16
Figura 5 - Forças atuantes em uma fatia. (Fonte: modificado de Massad, 2003).....	19
Figura 6 - Forças aplicadas a uma fatia pelo método de Janbu Simplificado.....	21
Figura 7 - Valores de $m_i$ para rocha intacta (Hoek, 2000).....	23
Figura 8 - Tabela de classificação do GSI, proposta por Hoek e Brown 1997. ....	25
Figura 9 - Mapa de localização do Morro da Forca .....	28
Figura 10 - Plano de foliação estendido com o auxílio da caderneta de campo para facilitar a medição da angulação. ....	29
Figura 11 - Foliações expostas na porção superior da superfície deslizada, talude em estado atual.....	30
Figura 12 - Passos para elaboração de uma retroanálise em conjunto a avaliação das precipitações que levaram ao evento estudado. ....	32
Figura 13 - Mapa da litologia do quadrilátero ferrífero (Fonte: a autora). ....	35
Figura 14 - Mapa da litologia do Morro da Forca - Ouro Preto. (Fonte: a autora) .....	36
Figura 15 - Descrição da tabela de atributos do mapa de litologia do Quadrilátero Ferrífero (Fonte: Instituto Prístino). ....	36
Figura 16 - Parâmetros geotécnicos definidos para o Morro do Curral. (Fernandes, Sobreira e Gomes (2003)).....	37

Figura 17 – Aplicação do triângulo de pressão da água. ....	38
Figura 18 - Gráfico de coesão e ângulo de atrito em função de FS pelo método de Janbu Simplificado e critério de Mohr-Coulomb para o xisto do Morro da Forca. ....	40
Figura 19 - Gráfico de $m_i$ e GSI em função de FS pelo método de Janbu Simplificado e critério de Hoek-Brown para o xisto do Morro da Forca .....	41
Figura 20 - Análise de estabilidade para uma ruptura planar pelo método de Janbu Simplificado e pelo critério de Mohr-Coulomb.....	43
Figura 21 - Análise de estabilidade para uma ruptura circular pelo método de Janbu Simplificado e pelo critério de Mohr-Coulomb.....	44
Figura 22 - Análise de estabilidade para uma ruptura planar pelo método de Janbu Simplificado e pelo critério de Hoek e Brown. ....	44
Figura 23 - Análise de estabilidade para uma ruptura circular pelo método de Janbu Simplificado e pelo critério de Hoek e Brown. ....	45
Figura 24 - Mapa da distância entre a estação 2043056 e o Morro da Forca (Fonte: a autora).....	46
Figura 25 - Gráfico do tempo de retorno das precipitações máximas diárias acumuladas anuais de 4 dias antecedentes em função das precipitações pelo método de GEV. ....	48
Figura 26 - Gráfico do tempo de retorno das precipitações máximas diárias anuais em função das precipitações pelo método de GEV.....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Histórico do Crescimento Populacional na Cidade de Ouro Preto .....	9
Tabela 2 - Definição de classes para eventos de chuva (adaptado de D’Orsi et.al., 2000). .....	11
Tabela 3 - Níveis de atenção para deslizamentos segundo as precipitações para a cidade de Ouro Preto .....	12
Tabela 4 - Intervalo de valores de coesão e ângulo de atrito encontrados pelo método de Bishop Simplificado para o xisto do Morro da Forca. ....	39
Tabela 5 - Intervalo de valores de GSI e $\mu$ encontrados pelo método de Janbu Simplificado para o xisto do Morro da Forca. ....	39
Tabela 6 - Intervalo de valores de coesão e ângulo de atrito encontrados pelo método de Janbu Simplificado para o xisto do Morro da Forca. ....	40
Tabela 7 - Valores médios definidos para coesão, ângulo de atrito, GSI e $\mu$ . ....	41
Tabela 8 - Valores de P-Valor para as distribuições Gumbel e GEV aplicadas aos dados de tempo de retorno da série histórica das máximas precipitações acumuladas anuais antecedentes, pelo método de Kolmogorov-Smirnov. ....	47
Tabela 9 - Cálculos do tempo de retorno para as chuvas máximas acumuladas anuais de 4 dias antecedentes. ....	48
Tabela 10 - Valores de P-Valor para as distribuições Gumbel e GEV aplicadas aos dados de tempo de retorno da série histórica das máximas precipitações diárias anuais, pelo método de Kolmogorov-Smirnov. ....	49
Tabela 11 - Cálculos do tempo de retorno para as chuvas máximas diárias anuais. ....	50

# SUMÁRIO

1	Introdução .....	1
1.1	Objetivo.....	3
1.1.1	Objetivos Específicos .....	3
2	Revisão Bibliográfica.....	4
2.1	Caracterização da Área de estudo.....	4
2.2	Movimentos Gravitacionais de Massa .....	6
2.2.1	Escorregamentos Planares/Translacionais .....	7
2.3	Ocupação Urbana.....	8
2.4	Correlação Entre Pluviometria e Movimentos Gravitacionais de Massa 10	
2.5	Estudo das Precipitações Máximas Anuais .....	12
2.6	Estabilidade de Taludes.....	15
2.6.1	Método do Equilíbrio Limite .....	16
2.6.2	Retroanálise .....	25
3	Metodologia .....	28
3.1	Localização da Área de Estudo .....	28
3.2	Análise Geotécnica.....	30
3.3	Análise das Precipitações.....	32
4	Resultados .....	35
4.1	Análises de Estabilidade.....	35
4.2	Análises das Precipitações Máximas Anuais.....	45

4.2.1	Análise da Precipitação Máxima Acumulada Anual de 4 Dias Antecedentes.....	47
4.2.2	Análise da Precipitação Máxima Diária Anual .....	49
5	Conclusão .....	53
	Referências.....	55

# 1 INTRODUÇÃO

Os movimentos gravitacionais de massa são eventos frequentes no Brasil, particularmente em regiões tropicais onde a precipitação intensa é comum. A água desempenha um papel crítico na ocorrência desses movimentos, pois sua presença pode diminuir a coesão e aumentar significativamente a carga sobre um talude, reduzindo o Fator de Segurança (FS) e potencialmente levando ao seu rompimento. Além da água, fatores como construção desordenada, vegetação inadequada, relevos acidentados e características geológicas e geomorfológicas contribuem para a instabilidade dos taludes.

O Morro da Forca, localizado em Ouro Preto, exemplifica esses desafios. Ouro Preto é uma cidade histórica inserida no Quadrilátero Ferrífero, uma área marcada pela intensa atividade mineradora que moldou seu desenvolvimento. A mineração histórica e a urbanização resultaram em um cenário geotécnico complexo, exacerbado pela alta pluviosidade da região. A cidade enfrenta problemas geotécnicos significativos, especialmente durante as estações chuvosas, que acentuam o risco de deslizamentos. A alta pluviosidade e a carga extra imposta pelo desenvolvimento urbano são fatores críticos que afetam a estabilidade do solo, principalmente quando coligados.

Em janeiro de 2022, o Morro da Forca foi afetado por um deslizamento de grandes proporções. Embora o histórico da área registre a ocorrência de outros eventos de instabilidade, nenhum deles teve a mesma magnitude. Este deslizamento se destacou pela quantidade de massa deslocada e pelos danos causados, incluindo a perturbação na logística da cidade. Em janeiro de 2023, o talude sofreu pequenos deslizamentos adicionais de menor intensidade, evidenciando a continuidade dos problemas geotécnicos e a necessidade urgente de intervenções corretivas e eficazes.

Dado o contexto histórico e geotécnico do Morro da Forca, é essencial realizar uma retroanálise detalhada para entender os fatores que contribuíram para os deslizamentos e para desenvolver estratégias de estabilização adequadas. A

retroanálise permitirá ajustar modelos existentes e implementar métodos de estabilização baseados em dados reais, contribuindo para a segurança e a sustentabilidade da área. Assim, este trabalho visa abordar a retroanálise do movimento gravitacional de massa ocorrido no Morro da Forca, explorando alguns dos métodos de avaliação de estabilidade disponíveis, vale ressaltar que esta análise de estabilidade está atrelada as condições em que o talude se encontra na data de realização deste trabalho, em março de 2025, as condições geológica-geotécnicas de um talude de tamanha magnitude podem variar rapidamente. A importância do estudo é destacada pela necessidade de proteger uma área de valor histórico e recreativo, assegurando que o Morro da Forca continue a ser um ponto de lazer seguro e agradável para a comunidade.

## **1.1 Objetivo**

O objetivo do presente trabalho é a realização de uma retroanálise detalhada do movimento gravitacional de massa ocorrido no Morro da Forca, em Ouro Preto, para avaliar suas condições de estabilidade e identificar os fatores que contribuíram para o deslizamento ocorrido em 2022, juntamente com a análise das precipitações na região, a fim de determinar o tempo de retorno da chuva que desencadeou tal deslizamento.

### **1.1.1 Objetivos Específicos**

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, serão estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Reconstruir a geometria de ruptura do talude;
- Levantar os dados geotécnicos do maciço rochoso da área em estudo;
- Realizar a retroanálise para verificar a situação do talude em iminência de ruptura;
- Levantar e compilar os dados pluviométricos das áreas próximas à região de estudo;
- Estudar o tempo de retorno da precipitação associada ao deslizamento ocorrido em 2022.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Caracterização da Área de estudo

No ano de 2022 o talude do Morro da Forca passou por um grande deslizamento que movimentou um intenso volume, como mostra a Figura 2, causando um impacto considerável na cidade. Essa movimentação levou ao desabamento de 3 construções, que são apresentadas na Figura 1, que se alojavam logo abaixo da zona movimentada, como o casarão de alto valor patrimonial de propriedade da prefeitura, o sacolão da estação e uma terceira construção, além de implicar em risco aos moradores das casas adjacentes, como o Hotel Nossa Senhora Aparecida.



Figura 1 - Construções que desabaram com a movimentação de massa (Fonte: Google Maps)



Figura 2 – Talude do Morro da Forca momentos após o deslizamento (Fonte: Jornal Hora do Povo, 2022)

Ao longo dos anos, o Morro da Forca já havia registrado deslizamentos de terra em 1979, 2011, 2012 e 2016. Esses eventos levaram à definição de áreas de risco geotécnico na cidade, culminando em uma classificação oficial das zonas de risco, que incluiu o Morro da Forca. A primeira avaliação geotécnica e o reconhecimento das áreas de alto risco foram realizados pela CPRM (Serviço Geológico do Brasil) e documentados na "Ação Emergencial para Reconhecimento de Áreas de Alto e Muito Alto Risco a Movimentos de Massa e Enchentes: Ouro Preto, MG" (CPRM, 2016). A classificação inicial do Morro da Forca como área de alto risco refletia a intensidade dos deslizamentos e as condições geotécnicas desfavoráveis da região.

Contudo, em 2023, uma nova avaliação foi realizada pela CPRM, levando à reclassificação da área estudada como de muito alto risco geotécnico. Este aumento na classificação foi motivado pela agravante vulnerabilidade geotécnica da região, evidenciada pela persistência de movimentos de massa e pela saturação contínua do solo, principalmente durante períodos de chuvas intensas (PMRR, 2023). Essa reavaliação sublinha a necessidade urgente de medidas de mitigação, considerando os riscos crescentes para a população e o patrimônio urbano local.

O Morro da Forca, situado na região central de Ouro Preto, apresenta uma geologia complexa e diversificada, característica do Quadrilátero Ferrífero. Segundo o Serviço Geológico Brasileiro (2010), esta área é composta por diferentes litologias, com destaque para a Formação Sabará, predominantemente formada por xistos e metagrauvas. De acordo com os dados do Plano Municipal de Redução de Riscos (PMRR, 2023), a classificação geológica do Morro da Forca corrobora essa caracterização, confirmando a predominância do xisto como litologia dominante na região, o que influencia diretamente nas condições de risco geotécnico da área.

## **2.2 Movimentos Gravitacionais de Massa**

Os movimentos gravitacionais de massa são processos geodinâmicos que oferecem riscos significativos, especialmente em áreas urbanas desordenadas, onde a ocupação irregular e as obras de infraestrutura agravam a suscetibilidade a escorregamentos, subsidência de terrenos e queda de blocos (FERNANDES, 2011). Esses fenômenos podem resultar em perdas substanciais, afetando diretamente sistemas essenciais como transporte rodoviário e ferroviário, além de oleodutos e gasodutos, comprometendo sua estabilidade e gerando impactos econômicos, sociais e ambientais severos.

Além disso, conforme Bastos (2012), os movimentos de massa envolvem uma significativa dissipação de energia e são responsáveis pelo deslocamento de material nas encostas. Esses eventos podem ser desencadeados tanto por fatores naturais quanto por intervenções humanas, tornando-se uma preocupação constante em regiões de relevo acidentado.

No Brasil, diversas cidades e zonas metropolitanas enfrentam recorrentes episódios de movimentos de massa, resultando em vítimas fatais e expressivos danos materiais. Ouro Preto, em particular, se destaca como uma das mais afetadas. Suas características morfológicas, climáticas e geológicas, aliadas ao relevo acentuado e ao elevado índice pluviométrico, favorecem a ocorrência desses processos e intensificam os riscos associados à instabilidade das formações rochosas (FERREIRA et al., 2004).

A cidade de Ouro Preto possui um Plano Municipal de Redução de Risco (PMRR), cuja primeira versão foi elaborada em 2016 e revisada em 2023. Este plano classifica as zonas da cidade conforme os riscos associados aos movimentos gravitacionais de massa, com variações de risco que vão de baixo a muito alto. Entre os locais identificados como de alto risco, destaca-se o Morro da Forca, que foi classificado como de muito alto risco devido à sua vulnerabilidade aos processos de instabilidade, especialmente em períodos de chuvas intensas.

### **2.2.1 Escorregamentos Planares/Translacionais**

Os escorregamentos planares, ou também conhecidos como translacionais, envolvem o deslocamento de massas rochosas ao longo de uma ou mais superfícies subparalelas, como planos de falha, planos de acamamento, planos de foliação, de juntas etc. Este tipo de movimento ocorre, geralmente, em rochas de estruturas bem orientadas, como ardósias, filitos, xistos, argilitos e folhelhos (Fiori, 2015). Feições planares no maciço rochoso condicionam os deslizamentos translacionais, como foliação, fraturas, falhas, entre outros (FORNASSARI FILHO e INFANTI JR., 1998)

Ainda segundo Fiori (2015) para que esse tipo de ruptura ocorra são observadas as seguintes condições:

- As superfícies devem ser aflorantes na face do talude;
- A inclinação das superfícies deve ser inferior a inclinação da superfície livre do talude;
- A inclinação das superfícies deve ser superior ao ângulo de atrito interno do talude;
- A direção do deslizamento deverá afastar-se de, no máximo, 20 graus em relação ao rumo de mergulho da face da vertente.

A Figura 3 demonstra alguns tipos de deslizamentos

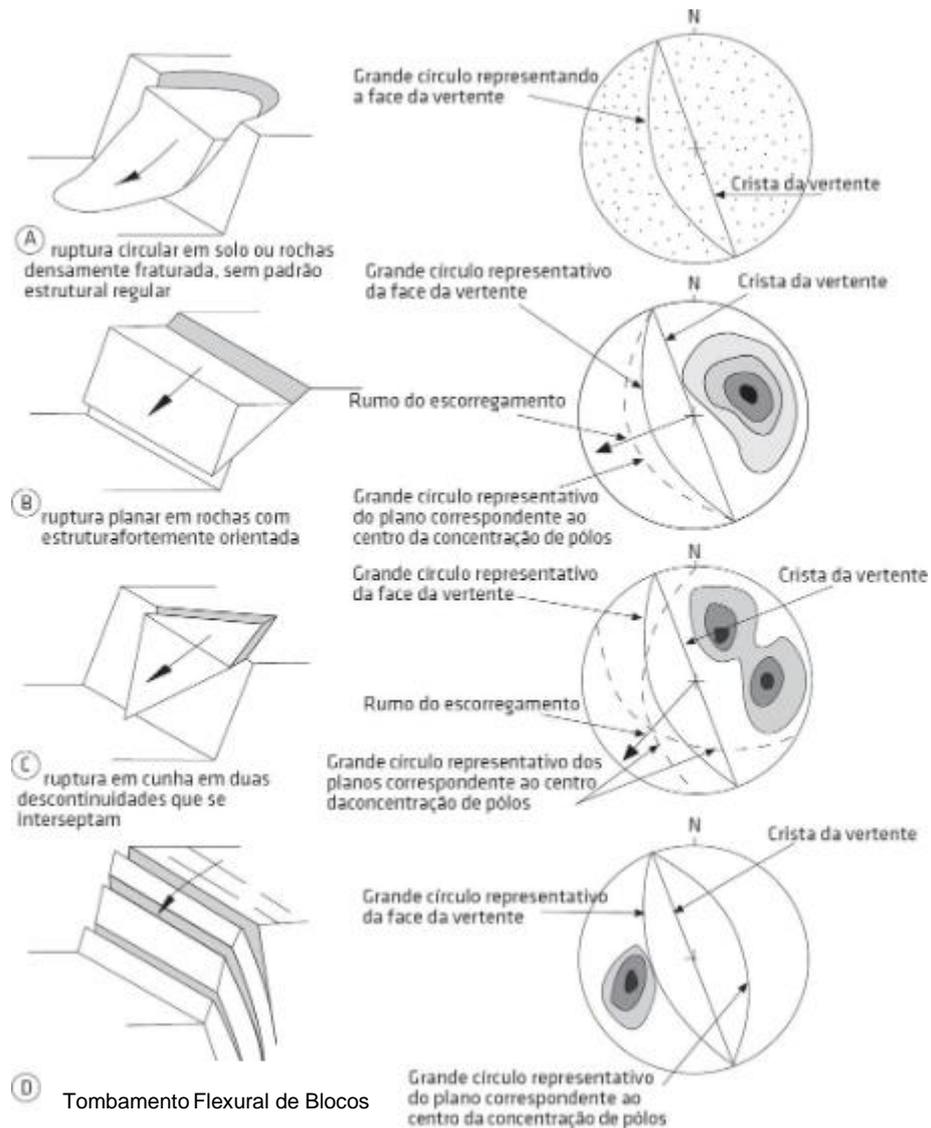


Figura 3 - Principais tipos de deslizamentos em vertentes e estereogramas de estruturas que podem dar origem a esses deslizamentos. (Fonte: adaptado de FIORI E CARMIGNANI, 2009).

### 2.3 Ocupação Urbana

A história da ocupação das cidades de Ouro Preto e Mariana está diretamente ligada à descoberta do ouro no final do século XVII. Localizadas nos contrafortes da Serra de Ouro Preto, essas cidades foram fundadas e se desenvolveram devido à abundância de depósitos de ouro aluvionar descobertos nesse período (TAVARES, 2006).

O auge da corrida do ouro ocorreu nos primeiros quartéis do século XVIII, impulsionando intensas atividades mineradoras, tanto subterrâneas quanto a céu aberto, em vales e encostas da região, especialmente na Serra de Ouro Preto (SOBREIRA e FONSECA, 2001). Esse cenário de intensa exploração modificou significativamente a paisagem e a estabilidade geotécnica da área, tornando-a suscetível a processos erosivos e movimentos de massa.

Com o passar do tempo, a ocupação dessas encostas tornou-se um fator de risco adicional. Segundo Pinheiro, Sobreira e Lana (2003), os riscos geotécnicos estão diretamente relacionados à susceptibilidade natural das encostas, agravada pela ocupação desordenada e por fatores socioeconômicos, como o baixo poder aquisitivo da população e a falta de tecnologias construtivas mais seguras. O crescimento urbano acelerado interferiu diretamente na estabilidade dessas áreas, aumentando a vulnerabilidade a deslizamentos.

Esse crescimento populacional continua a ser um desafio para a cidade. De acordo com dados do IBGE, a população de Ouro Preto tem aumentado nas últimas décadas, conforme apresentado na Tabela 1. Entretanto, esse crescimento ocorre em um contexto de limitações geográficas impostas pelo relevo acidentado. Cercada por encostas íngremes e diante de uma especulação imobiliária que eleva os preços das áreas centrais, a população tem se expandido para zonas de risco, agravando os desafios relacionados à segurança e à ocupação do solo.

Tabela 1 - Histórico do Crescimento Populacional na Cidade de Ouro Preto

Ano	População
1991	62.514
1996	61.350
2000	66.277
2007	67.048
2010	70.281
2022	74.821

## 2.4 Correlação Entre Pluviometria e Movimentos Gravitacionais de Massa

Eventos extremos de precipitação, bem como baixos índices pluviométricos precedidos por chuvas acumuladas nos dias anteriores, desempenham um papel crucial na deflagração e no potencial aumento da instabilidade dos taludes, favorecendo os movimentos de massa (SILVA, 2014).

A influência da precipitação nesses processos pode ser explicada por diferentes mecanismos. Segundo Tatizana et al. (1987) e Delmanaco et al. (1995), os principais fatores envolvidos incluem:

- Alteração dos parâmetros de resistência dos materiais: diminuição da coesão aparente, eliminação das tensões capilares, dissolução da cimentação;
- Aumento da sollicitação externa: aumento do peso específico dos materiais que formam a encosta;
- Avanço da frente de saturação no maciço, provocando o desenvolvimento de poropressões positivas nos solos, subpressões nas discontinuidades rochosas e forças de percolação;
- Alteração do perfil da encosta por erosão de materiais.

A predominância dos escorregamentos ocorre durante o período chuvoso, especialmente ao final da estação, quando o acúmulo de precipitação atinge níveis críticos. Esse comportamento leva à hipótese de que a formação de poropressões positivas próximas à superfície ou ao longo das encostas seja um dos principais mecanismos de ruptura (CASTRO, 2006).

Ainda segundo Castro (2006), mesmo após o término das chuvas, a água infiltrada continua a se redistribuir no subsolo, elevando o teor de umidade inicial. Assim, uma nova precipitação subsequente pode acelerar o avanço da frente de saturação, reduzindo rapidamente a resistência ao cisalhamento dos solos acima dessa zona e potencializando novas rupturas.

A profundidade do movimento de massa também está relacionada à distribuição e duração das chuvas. Conforme Delmonaco et al. (1995), movimentos de massa

profundos tendem a ocorrer em função do acúmulo de chuvas ao longo de vários dias, enquanto movimentos superficiais são mais dependentes da intensidade e da duração das precipitações em períodos curtos.

Entretanto, a correlação entre pluviosidade e movimentos de massa não pode ser analisada isoladamente. Segundo Temoteo (1993), essa relação é altamente complexa, pois diversos fatores geotécnicos e ambientais atuam como agentes condicionantes, incluindo o tipo de material, a morfologia e declividade das encostas, o sistema de drenagem natural, a presença de vegetação e a ação antrópica. Apesar dessa complexidade, a influência das chuvas nos processos gravitacionais é amplamente reconhecida, motivando diversos estudos na área.

Neste contexto, alguns estudos exploraram a relação entre precipitação e instabilidade de encostas. D'Orsi et al. (2000) analisaram essa correlação para a cidade do Rio de Janeiro, permitindo classificar a intensidade das chuvas em função da quantidade de ocorrências geotécnicas registradas. A Tabela 2 apresenta essa relação, evidenciando como os volumes pluviométricos podem ser utilizados como indicadores de risco para deslizamentos.

Tabela 2 - Definição de classes para eventos de chuva (adaptado de D'Orsi et.al., 2000).

<b>Categoria do Evento de Chuva</b>	<b>Número de Acidentes Geotécnicos</b>
Fraco	Até 25
Moderado	25 a 125
Forte	125 a 250
Catastrófico	> que 250

Os dados da Tabela 2 confirmam que os eventos extremos de chuvas intensas são os maiores responsáveis por um número elevado de acidentes geotécnicos, como os movimentos gravitacionais de massa, em geral quanto maior a intensidade dessas chuvas maior será a chance de eventos naturais geotécnicos mais graves e de maior porte.

Esta correlação também pode ser evidenciada por meio dos níveis de alertas que algumas cidades implementaram como um meio de tentar prever quando os movimentos gravitacionais de massa começam a ser desencadeados de acordo com a intensidade e frequência das chuvas de cada local em particular.

Nesse contexto, Silva (2014) realizou uma análise específica para a sub-bacia do alto Ribeirão do Carmo, em Ouro Preto, determinando os valores mínimos de precipitação acumulada necessários para desencadear eventos geológico-geotécnicos na região. A Defesa Civil de Ouro Preto disponibiliza em seu aplicativo o monitoramento dos índices pluviométricos registrados na cidade e arredores, conforme os índices pluviométricos vão aumentando de acordo com o acumulado de chuvas de 5 dias os níveis vão avançando de: observação, alerta e alerta extremo, onde para os níveis de observação são monitorados os índices pluviométricos para possíveis avanços de níveis de atenção, alerta tem-se que deslizamentos podem vir a ocorrer isoladamente e para níveis de alerta extremo onde aumenta-se a probabilidade de ocorrência desses eventos com maior intensidade e frequência. A Tabela 3 mostra os limites pluviométricos que os níveis de atenção seguem.

Tabela 3 Níveis de atenção para deslizamentos segundo as precipitações para a cidade de Ouro Preto

<b>Níveis de Atenção Para Deslizamentos de Acordo com as Precipitações</b>	
Observação	0 mm a 22 mm
Alerta	22 mm a 128 mm
Alerta Extremo	> 128 mm

## 2.5 Estudo das Precipitações Máximas Anuais

A precipitação é um dos elementos climáticos de grande influência nas atividades humanas, sendo o estudo de eventos extremos essencial para o dimensionamento de obras hidráulicas (OLIVEIRA et al., 2014). No entanto, sua relevância vai além do planejamento dessas estruturas, abrangendo também a análise da estabilidade de taludes. Nesse contexto, o estudo das precipitações máximas anuais é amplamente utilizado para avaliar os riscos associados a eventos extremos, como as chuvas

intensas que ocorreram em 2022 e podem levar a ocorrência de eventos naturais, como os movimentos gravitacionais de massa que levaram ao deslizamento do talude do Morro da Forca. Neste contexto, é fundamental a análise não apenas das máximas diárias anuais, mas também das máximas acumuladas anuais. Para esta última, estudos na área indicam que a precipitação acumulada em 4 dias é mais utilizada na elaboração de sistemas de alerta de Defesa Civil que correlacionam as precipitações com movimentos gravitacionais de massa, como destacado na pesquisa de Amaral (2018).

Sendo assim, o tempo de retorno de chuvas intensas torna-se um parâmetro fundamental para prever a recorrência de eventos pluviométricos que podem impactar essas estruturas geotécnicas. Compreender esse tempo de retorno permite avaliar a frequência e a intensidade das precipitações, auxiliando na definição de medidas preventivas e estratégias de mitigação de riscos, uma vez que correlaciona a intensidade das precipitações e a frequência de sua ocorrência.

Freire et al. (2012) destacam que o conhecimento das precipitações máximas é essencial para evitar problemas como erosão do solo, inundações, queda na produção agrícola, danos em estradas, prejuízos em projetos de obras hidráulicas e falhas em sistemas de drenagem. Para estimar a recorrência desses eventos, é necessário recorrer a métodos estatísticos baseados na análise de distribuição de frequência, que permitem estimar o período de retorno de um evento máximo anual de chuva. Esse período, expresso em anos, representa a probabilidade de que determinado evento seja igualado ou excedido pelo menos uma vez, em média, dentro de um intervalo de tempo específico (ELTZ et al., 1992).

Diversas distribuições probabilísticas são aplicadas na engenharia hidrológica para esse tipo de análise, permitindo uma estimativa mais confiável da frequência e intensidade das chuvas extremas. Entre as metodologias mais empregadas, destaca-se a distribuição Generalized Extreme Value (GEV), reconhecida por sua elevada precisão na modelagem de eventos naturais extremos (OLIVEIRA et al., 2014). Além disso, a distribuição de Gumbel é amplamente utilizada para determinar a precipitação máxima, o período de recorrência de chuvas intensas e para a construção de curvas

intensidade-duração-frequência. Estudos demonstram que essa distribuição apresenta um bom ajuste aos fenômenos meteorológicos, especialmente à precipitação pluvial máxima (SOUZA et al., 2016).

Para ajustar essas distribuições aos dados observados, diferentes métodos de estimativa de parâmetros podem ser utilizados. O Método dos Momentos, por exemplo, é empregado na distribuição GEV devido à sua simplicidade. No entanto, em amostras reduzidas, seus estimadores podem apresentar menor precisão em relação a outros métodos. O Método da Máxima Verossimilhança é considerado o mais eficiente por proporcionar estimadores com maior plausibilidade, mas sua aplicação a amostras pequenas pode resultar em estimativas de qualidade comparável ou inferior a outros métodos. Outra alternativa é o método dos Momentos-L, que gera estimadores comparáveis aos da Máxima Verossimilhança, com a vantagem de exigir menor esforço computacional (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

A distribuição de Gumbel é amplamente aplicada na modelagem de eventos hidrológicos extremos, especialmente na análise de precipitações máximas diárias anuais (BERTONI; TUCCI, 2001). Segundo Back et al. (2011), essa distribuição apresenta um bom ajuste para estudos de chuvas intensas, sendo utilizada na estimativa de valores associados a diferentes tempos de retorno, fundamentais para o dimensionamento de obras hidráulicas. A estimativa de seus parâmetros pode ser feita pelo Método dos Momentos ou pela Máxima Verossimilhança, sendo esta última a mais eficiente para maximizar a probabilidade de ocorrência dos valores observados (MELO; SILVA, 2005).

Nas análises dos eventos extremos, como as chuvas intensas, a representação dos dados por meio de gráficos de distribuições probabilísticas é um meio amplamente utilizado. Estudos como Alves et al (2013), Quadros, Queiroz e Boas (2011) e Oliveira et al (2014) utilizam desta metodologia para auxiliar a interpretação destes parâmetros. Nos gráficos de distribuição mais utilizados é comum encontrar a representação dos tempos de retorno (em anos) no eixo horizontal e as precipitações máximas anuais nos eixos verticais, permitindo então encontrar a relação entre a probabilidade de ocorrência com a intensidade das chuvas.

## 2.6 Estabilidade de Taludes

A estabilidade de um talude é influenciada por diversos parâmetros, incluindo sua geometria, ângulo de atrito, peso específico do material, coesão, geologia estrutural, condições do maciço, condições de saturação e o efeito escala. Em uma análise de estabilidade, esses fatores são classificados como elementos de estabilização ou instabilização, permitindo a avaliação do nível de segurança do talude. Para uma análise precisa, é essencial compreender detalhadamente o comportamento e a interação desses parâmetros em cada caso específico.

Lacerda (2002) afirma que os processos erosivos que contribuem para a instabilidade de massas coluviais, atuando de forma contínua ou intermitente, estão geralmente associados a períodos de alta pluviosidade. Esse fenômeno intensifica a degradação dos solos e pode reduzir a resistência do material, favorecendo a ocorrência de deslizamentos.

Os aumentos de poro-pressão são mais altos nos taludes em rochas do que nos taludes em solo para uma dada precipitação, e a capacidade potencial de eventos de precipitação como mecanismos deflagradores de rupturas é, portanto, maior nos taludes em rocha (FREEZE e CHERRY, 1979). De acordo com Sharp, Maini e Harper (1972, apud FREEZE; CHERRY, 1979), taludes estratificados horizontalmente, em que a direção principal da anisotropia é horizontal, não desenvolvem poro-pressões tão grandes como em taludes onde a estratificação e a direção principal de anisotropia têm mergulho paralelo à face da encosta. O modelo da Figura 4 é meramente ilustrativo com o intuito de demonstrar a aplicação da ação da água em taludes de rocha fraturados.

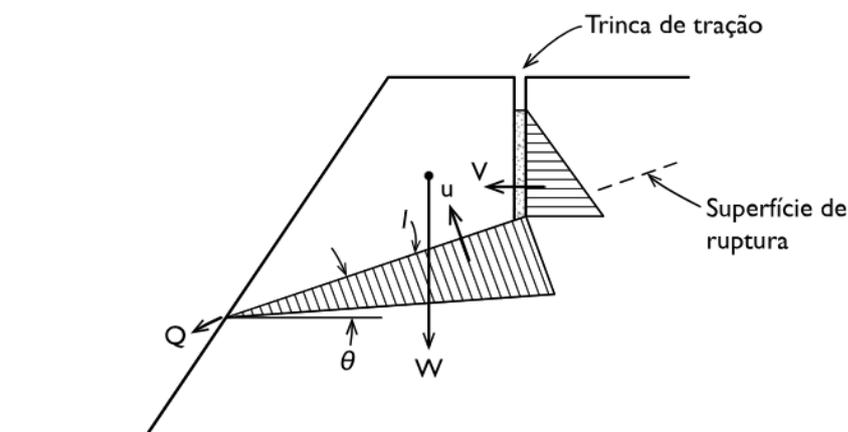


Figura 4 – Representação de como a água atua em taludes de rocha.

Segundo Gomes (2003), a estabilidade de um talude pode ser avaliada por diferentes métodos, incluindo abordagens analíticas, determinísticas, de análise limite, experimentais e empíricas. Essa estabilidade é expressa pelo fator de segurança, um indicador fundamental para a análise de risco e para a implementação de medidas preventivas.

Gomes (2003) acrescenta que, considerando o comportamento do talude como um material rígido-plástico, aplica-se a teoria do equilíbrio limite. Essa abordagem utiliza a estática para determinar os esforços atuantes no talude, sendo o FS calculado como a razão entre os esforços resistentes disponíveis e os esforços cisalhantes. Para isso, é fundamental a definição dos parâmetros de resistência, uma vez que eles influenciam diretamente na confiabilidade da análise e na tomada de decisões quanto à necessidade de intervenções geotécnicas.

### 2.6.1 Método do Equilíbrio Limite

A análise de estabilidade de taludes por meio do método do equilíbrio limite se dá pela relação entre as componentes estabilizadoras e as desestabilizadoras, sendo as componentes definidas em força, tensões e/ou momentos. Essa razão entre as componentes é definida como fator de segurança e está descrita na equação 1 a seguir.

$$F.S = \frac{\sum \text{componentes estabilizadoras}}{\sum \text{componentes desestabilizadoras}} \quad \text{Equação 1}$$

Este método é muito utilizado devido a sua simplicidade, que permite uma solução analítica, e a obtenção de um parâmetro concreto, o F.S. que quantifica a estabilidade do talude. Em geral admitem-se geometrias de ruptura simples, planar, rotacional, poligonal ou mista. Levando em consideração a equação 1, onde as componentes que estabilizam o talude são divididas pelas componentes que o desestabilizam, deduz-se que para  $F.S < 1$  o talude rompeu;  $F.S = 1$  eminência de ruptura e  $F.S > 1$  talude estável.

Existem diversas causas que podem levar um talude, até então estável, a um movimento gravitacional de massa, normalmente um conjunto destas causas são os responsáveis, porém para a cidade de Ouro Preto é evidente que um dos maiores influenciadores é a ação da água infiltrada, uma vez que os dados de ocorrências de deslizamentos na cidade apresentam-se sempre em períodos de chuva. A presença de fluidos nas rochas em processo de deformação é importante em dois aspectos. Primeiro, porque promove reações mineralógicas, particularmente em temperaturas elevadas que, por sua vez, afetam as propriedades mecânicas das rochas. Segundo, porque reduz os efeitos da pressão litostática ou confinante pelo efeito da pressão de poros, reduzindo a pressão litostática à pressão efetiva (Fiori e Wandresen, 2014).

Muitos materiais rochosos mostram evidências de deformação frágil e plástica, e essa condição depende de diversos fatores, como o valor da tensão diferencial ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ); a pressão hidrostática ou litostática; a temperatura; a taxa ou velocidade de deformação; a pressão de fluidos, entre outros (Fiori e Wandresen, 2014).

Para Massad (2010), o método do equilíbrio limite se baseia na hipótese de haver equilíbrio em uma massa de solo ou rocha, tomada como corpo rígido-plástico, na

iminência de entrar em um processo de escorregamento. Dessa forma, os métodos de equilíbrio limite partem dos seguintes pressupostos:

- O material se comporta como rígido-perfeitamente, isto é, rompe-se bruscamente, sem se deformar;
- As equações de equilíbrio estático são válidas até a iminência da ruptura, quando, na realidade, o processo é dinâmico;
- O fator de segurança é constante ao longo da linha de ruptura, isto é, ignoram-se eventuais fenômenos de ruptura progressiva.

Existem algumas variações dos métodos de equilíbrio limite, sendo diferenciadas por pequenas simplificações. Dentre as variações existentes, os métodos mais utilizados são os de Fellenius (1936), Janbu Simplificado (1973), Bishop (1954), Bishop Simplificado (1955), Morgenstern e Price (1965) e Spencer (1967).

Para o estudo em questão optou-se pelos métodos de Bishop Simplificado e Janbu Simplificado, neste caso tem-se Janbu que leva em consideração as forças e Bishop que leva em consideração os momentos. Como a ruptura ocorrida é bidirecional determinou-se a aplicação dos métodos com duas fatias, uma para cada inclinação.

#### 2.6.1.1 Método de Bishop Simplificado

Bishop em 1955 elaborou uma modificação do método proposto por Fellenius levando em consideração as reações existentes entre as fatias vizinhas. Assim o método de Bishop realiza o equilíbrio de momentos (resistentes e atuantes) e o equilíbrio das forças que agem em cada lamela.

Por sua vez, o método de Bishop Simplificado considera que a superfície de ruptura admite uma forma circular e que a resultante das forças entre as fatias é horizontal e se anulam, desconsiderando as forças tangenciais entre elas. O equilíbrio das forças é verticalizado, dessa forma satisfaz a mais uma condição de equilíbrio. A Figura 5 demonstra a distribuição das forças consideradas para as fatias.

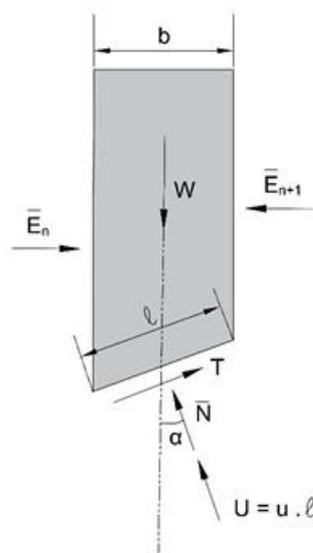


Figura 5 - Forças atuantes em uma fatia. (Fonte: modificado de Massad, 2003).

Onde:

$c'$  é a coesão efetiva centro da base da fatia

$\phi'$  é o ângulo de atrito efetivo centro da base da fatia

$l$  é o comprimento da fatia

$u$  é a poropressão no centro da base da fatia

$b$  é a espessura da fatia

$E_n$  e  $E_{n+1}$  são as resultantes das forças horizontais totais atuantes nas seções  $n$  e  $n + 1$  respectivamente.

Desta forma, o fator de segurança pode ser calculado a partir das seguintes equações:

$$FS = \frac{\sum [b \times c' + (W - u \times b) \times \tan \phi'] \times \frac{1}{M \alpha}}{\sum W \times \sin \alpha} \quad \text{Equação 2}$$

$$b = l \times \cos \alpha \quad \text{Equação 3}$$

$$M(\alpha) = \cos \alpha \left( 1 + \frac{\tan \phi' \times \tan \alpha}{FS} \right) \quad \text{Equação 4}$$

Onde  $W$  é o peso no centro da base da fatia

Apesar de ser simplificado e não considerar equilíbrio de forças horizontais, este método fornece resultados próximos aos dos métodos rigorosos.

#### 2.6.1.2 Método de Janbu Simplificado

Segundo Gerscovich (2016), o método de Janbu simplificado teve como objetivo a redução do esforço computacional exigido pelo método rigoroso, o que possibilitou a obtenção do FS através de cálculos mais simples. O método tem aplicabilidade para análise de taludes homogêneos, porém não fornece resultados de qualidade para superfícies de ruptura em formato de cunha. As forças cisalhantes interlamelares têm seus efeitos no cálculo através de um fator de correção ( $f_0$ ), obtido mediante a comparações feitas entre os fatores de segurança obtidos pelos métodos simplificado e generalizado.

O método de Janbu (1973) pode ser empregado quando as superfícies de escorregamento não sejam necessariamente circulares. O valor de FS obtido pelo método de Janbu Simplificado é igual ao encontrado pelo método de Bishop, multiplicado por um fator  $f_0$ . O fator  $f_0$  depende da geometria da superfície de escorregamento estudada e dos parâmetros  $c$  e  $\phi$ , levando em consideração a influência das forças verticais entre as lamelas. Geralmente o valor obtido para o  $f_0$  está compreendido entre 1,0 e 1,3 (ROGÉRIO, 1977 apud FIORI, 2015).

O método de Janbu Simplificado ignora as forças normais e de corte entre fatias, e satisfaz apenas o equilíbrio de forças. A reação normal na base é calculada pela equação de equilíbrio de forças verticais (Fredlund, 1977). A equação do equilíbrio de forças verticais que resultam em um fator de segurança pode ser observada na equação 5 e na Figura 6.

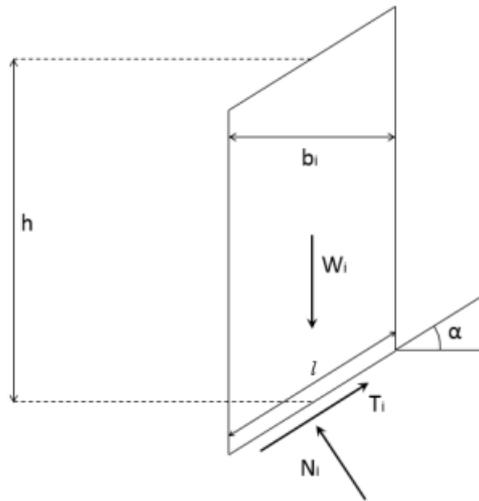


Figura 6 - Forças aplicadas a uma fatia pelo método de Janbu Simplificado

$$FS = \frac{1}{\sum W \tan \alpha} \times \sum \left[ [c' \times b + (W - u \times b) \tan \phi'] \frac{\sec^2 \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha \times \tan \phi'}{FS}} \right] \quad \text{Equação 5}$$

Devido à redução na quantidade de variáveis, Gerscovich (2013) recomenda que o método simplificado seja aplicado apenas a taludes homogêneos. Adicionalmente, a autora ressalta que os resultados não são muito satisfatórios no caso de superfícies poligonais.

### 2.6.1.3 Critério de Mohr-Coulomb

A maioria dos programas geotécnicos comerciais de estabilidade de taludes adota o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, o que exige a introdução do valor do ângulo de atrito e da coesão para cada um dos diferentes materiais presentes no problema em análise (Hoek, 2002).

Este critério estabelece que a ruptura de um dado material ocorre quando a tensão tangencial ( $\tau$ ) iguala a resistência ao corte ( $\tau_f$ ) do material. Considera ainda que a resistência ao corte depende do valor do ângulo de atrito interno das suas partículas constituintes ( $\phi'$ ) e da sua coesão ( $c'$ ) (OLIVEIRA, 2014). O valor da resistência ao corte, para um dado valor de tensão é dado pela equação 6

$$\tau_f = c' + \sigma' n \tan \phi' \quad \text{Equação 6}$$

Onde

$\sigma'$  é a tensão efetiva

$n$  é o fator de forma, que depende da forma da superfície de ruptura

#### 2.6.1.4 Critério de Hoek-Brown Generalizado

Hoek et al. (2002) propuseram um critério pelo qual é possível determinar os parâmetros de resistência de maciços rochosos. O critério generalizado desenvolvido por Hoek para maciços rochosos é traduzido pela expressão (Hoek 2007):

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m_i \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad \text{Equação 7}$$

onde:

$\sigma'_1$  e  $\sigma'_3$  representam as tensões efetivas principais máxima e mínima;

$\sigma_{ci}$  é referente à resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;

$m_i$  é uma constante cujo valor depende das propriedades da rocha intacta.

$s$  e  $a$  são constantes que dependem da natureza do maciço rochoso.

A utilização do critério de Hoek-Brown na estimativa da resistência e deformabilidade de maciços rochosos exige a análise de três propriedades: resistência à compressão uniaxial ( $\sigma_{ci}$ ), valor da constante de Hoek-Brown ( $m_i$ ) e valor do índice de resistência geológica da massa rochosa (GSI). A resistência da massa rochosa depende das propriedades das zonas de rocha intacta e da liberdade exibida por essas zonas em deslizar e rodar debaixo de diferentes estados de tensão. Esta liberdade é controlada pela forma geométrica das zonas de rocha intacta assim como pela condição das superfícies das discontinuidades. Uma zona de rocha angular com superfícies de discontinuidades limpas e rugosas irá ser mais resistente do que uma zona da rocha com características mais arredondadas e com as superfícies das discontinuidades preenchidas por material fraco e alterado (Hoek 2007).

Os valores de  $s$  e  $a$  são definidos pelas equações descritas abaixo:

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \quad \text{Equação 8}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right)$$

Equação 9

Onde o GSI é o Índice Geológico de Resistência introduzido por Hoek (1994) e D é um fator de perturbação que o maciço foi submetido por desmonte a fogo ou escavação. Onde D varia entre 0 para não perturbado, 1 para muito perturbado e 0,7 para taludes perturbados por escavação.

Os valores de  $m_i$  são obtidos através de ensaios triaxiais, porém uma tabela, representada na Figura 7 com valores típicos para a litologia das rochas intactas é muito utilizada para determinação deste parâmetro quando não se tem a disponibilização de tal ensaio.

Tipo de rocha		Rocha e valores de $m_i$			
Ígneas	Intrusiva	Granito: 32±3 Granodiorito: 29±3	Diorito: 25±5 Dolerito: 16±5	Gabro: 27±3 Norito: 22±5	Peridotito: 25±5
	Extrusiva	Riolito: 16±5	Andesito: 25±5	Basalto: 16±5 Diabásio: 16±5	Pórfiros: 20±5
	Vulcânica		Aglomerado: 19±3	Tufos: 13±5	
Sedimentares	Clástica	Conglomerado: 4±18 Brecha: 4±16	Arenito: 17±4	Siltito: 7±2 Margas: 7±2	Argilito: 4±2 Folhelho: (6±2)
		Carbonática	Calcário cristalino: 12±3	Calcário Esparítico: 10±2	Calcário Micrítico: 9±2
	Química			Gipso: 8±2 Anidrito: 12±2	
		Orgânica			Carvão: 8±12
Metamórficas	Foliada	Gnaisse: 28±5	Xisto: 12±3	Filito: 7±3	Ardósia: 7±4
	Levemente foliada	Migmatito: 29±3	Anfibolito: 26±6		
	Sem foliação	Quartzito: 20±3	Metarenito: 19±3	Hornfels: 19±4	Mármore: 9±3

Figura 7 - Valores de  $m_i$  para rocha intacta (Hoek, 2000)

O GSI foi desenvolvido por Hoek et al. (1994) com o propósito de estimar parâmetros essenciais para o critério de Hoek & Brown. Sua criação surgiu da necessidade de uma alternativa viável, tanto tecnicamente quanto economicamente, para a obtenção desses parâmetros, já que sua determinação por meio de ensaios in situ apresenta desafios significativos. Embora inicialmente não tenha sido concebido como um sistema de classificação de maciços rochosos, sua similaridade com métodos como o RMR e o Sistema-Q permitiu que fosse adotado também para essa finalidade. A estimativa do GSI baseia-se principalmente na análise da estrutura do maciço e na qualidade das superfícies de descontinuidade da rocha. A tabela de classificação para o GSI é apresentada na Figura 8.

GSI			
<p>Com base nos códigos de letras que descrevem a estrutura e as condições da superfície do maciço rochoso, determine a caixa apropriada nesta tabela. Deve-se estimar o valor médio do índice GSI pelos contornos. Não tente ser muito preciso, estabelecer um intervalo GSI de 36 - 42, é mais realista do que afirmar que o GSI = 38.</p>			
ESTRUTURA		DIMINUIÇÃO DA QUALIDADE DA SUPERFÍCIE →	
 <p>Em blocos - maciço rochoso com pedaços muito bem interconectados e não-perturbados, constituído por blocos cúbicos formados por três conjuntos de descontinuidades ortogonais</p>	<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">DIMINUIÇÃO DA INTERCONNECTIVIDADE ENTRE OS PEDAÇOS DE ROCHA</p>	80	MUITO BOM Superfícies muito ásperas, rocha sã, sem alteração
 <p>Muitos blocos interconectados - maciço rochoso parcialmente perturbado com blocos angulares multifacetados formados por quatro ou mais conjuntos de descontinuidades</p>		70	BOM Superfícies ásperas, ligeiramente intemperizadas, podendo ocorrer manchas ferruginosas
 <p>Em blocos/"caótico" - dobrado e/ou com falhas, blocos angulosos formados por muitos conjuntos de descontinuidades que se interceptam</p>		60	RAZOÁVEL Superfícies lisas, moderadamente alterada e/ou intemperizada
 <p>Desintegrado - blocos pobremente interconectados, maciço rochoso bastante fragmentado com mistura de rochas com pedaços angulosos e/ou arredondados</p>		50	RUIM - Superfícies estriadas, altamente intemperizadas com revestimentos compactos ou preenchimento por fragmentos angulosos
		40	MUITO RUIM - Superfícies estriadas, altamente intemperizadas, revestidas ou preenchidas por argila mole
		30	
		20	
		10	

Figura 8 - Tabela de classificação do GSI, proposta por Hoek e Brown 1997.

### 2.6.2 Retroanálise

A retroanálise é a análise da estabilidade de um talude que sofreu ruptura com o intuito de se determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito) dos materiais que o compõem para as condições de carregamento e características geométricas que provocaram a movimentação de massa (MEIER; TABALIPA; FARO, 2019). Esse método consiste em ajustar os valores de resistência

ao cisalhamento até que os cálculos reproduzam condições próximas às reais, tornando-se especialmente útil na investigação de rupturas de taludes (Lambe & Whitman, 1969). Para o método de Hoek e Brown a mesma ideologia é mantida, porém variam-se valores de GSI e  $m_i$  para obtenção dos dados de qualidade da rocha.

A retroanálise é amplamente utilizada na engenharia geotécnica quando os parâmetros necessários para a avaliação da estabilidade não estão disponíveis. Em muitos casos, valores como a coesão e o ângulo de atrito interno, essenciais para projetos de estabilização de taludes e demais obras geotécnicas, não são conhecidos e não podem ser determinados com precisão por meio de ensaios laboratoriais. Nessas situações, a aplicação da retroanálise torna-se uma ferramenta fundamental para a obtenção de parâmetros representativos, permitindo uma avaliação mais confiável do comportamento geotécnico da estrutura em estudo.

Guidicini e Nieble (1984) afirmam que a retroanálise é um método bastante rápido e de baixo custo para se obterem os dados de resistência ao cisalhamento em locais que já sofreram colapso. Conforme Augusto Filho e Virgilli (1998), para a utilização da retroanálise são consideradas, nos métodos determinísticos, as condições geométricas, geotécnicas e hidrológicas do talude no momento da ruptura. Com a forte influência das precipitações na estabilidade dos taludes faz-se fundamental a avaliação destes dados para entender de forma mais aprofundada como se encontrava a situação de saturação do maciço no momento de ruptura.

A metodologia adotada para a retroanálise do talude do Morro da Forca foi o Equilíbrio Limite, utilizando o método de Bishop Simplificado. Esse método permite considerar forças entre as fatias sem a necessidade de assunções complexas sobre suas interações, sendo amplamente empregado na análise de estabilidade de taludes naturais e artificiais (Bishop, 1955).

Além disso, também se considerou o método de Janbu simplificado (1973). Esse método considera o equilíbrio de forças atuantes no maciço sem impor restrições sobre o formato da superfície de ruptura, permitindo sua aplicação em geometrias mais complexas. No entanto, por não satisfazer completamente o equilíbrio de momentos, seus resultados podem exigir um fator de correção empírico para maior

precisão (JANBU, 1973). Dessa forma, sua utilização neste estudo complementa a análise feita pelo método de Bishop, proporcionando uma avaliação mais abrangente da estabilidade do talude. Estudos como o de Nogueira (2016) mostram que o método do equilíbrio limite para taludes homogêneos é melhor aplicável.

Após avaliar a variabilidade dos dados que resultaram em um fator de segurança igual a 1, são definidos os valores médios ajustados de coesão, ângulo de atrito, GSI e  $m_i$ . Esses parâmetros são então utilizados para avaliar a estabilidade do talude em sua condição atual e para uma nova verificação da segurança. Essa abordagem não apenas auxilia na compreensão do evento passado, mas também contribui para a definição de critérios mais precisos para futuras análises e projetos na região.

Para a realização de uma retroanálise pode ser empregado um método determinístico ou probabilístico. No método determinístico aplicam-se valores fixos e, apesar de facilitar os cálculos, esta ideologia pode não ser tão abrangente, uma vez que não considera a variabilidade dos parâmetros geotécnicos, já o método probabilístico leva em consideração as variabilidades e incertezas desses parâmetros, fornecendo dados com uma maior confiabilidade. A aplicação do método probabilístico é amplamente utilizada neste tipo de análise, estudos como Maia, Sayão e Salles (2000) e Bretas (2020) mostram esta aplicação.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Localização da Área de Estudo

O Morro da Forca está situado no centro histórico da cidade de Ouro Preto, Minas Gerais. Para facilitar a identificação da área de estudo, elaborou-se um mapa de localização, apresentado na Figura 9.

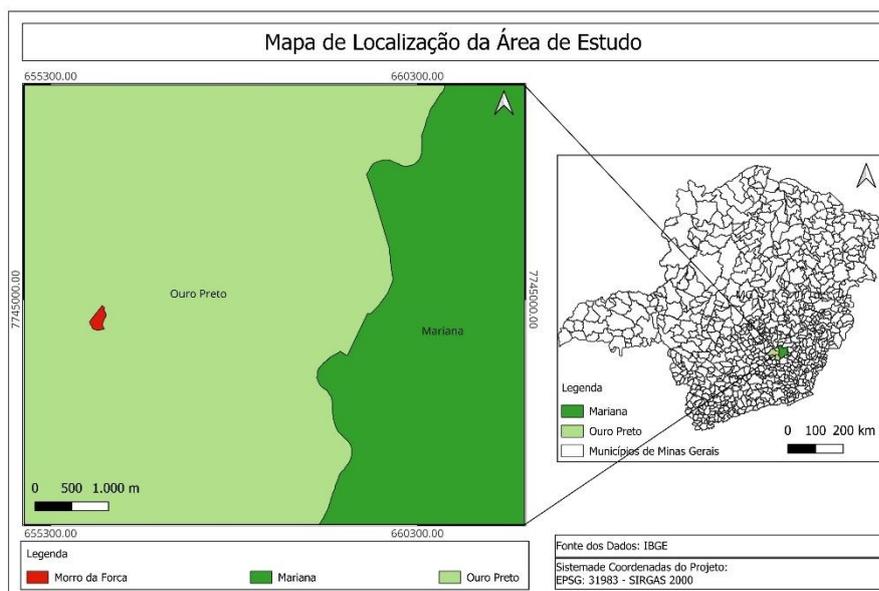


Figura 9 - Mapa de localização do Morro da Forca

O deslizamento ocorrido em 2022 no Morro da Forca foi classificado como um movimento translacional, caracterizado pelo deslocamento da massa ao longo da linha de foliação do talude. Durante o trabalho de campo, foi constatado que a inclinação dessas camadas é de  $66^{\circ}$ , conforme medição realizada na lateral do talude, próximo à Rua Pacífico Homem, conforme mostra a Figura 10. Dessa forma, a superfície de ruptura superior segue essa angulação, formando uma linha mais inclinada no modelo. Para a coleta do dado de angulação do talude contou-se com o auxílio do app Inclinômetro Geológico.



Figura 10 - Plano de foliação estendido com o auxílio da caderneta de campo para facilitar a medição da angulação.

Essa configuração permitiu que a massa deslizada escorregasse sobre as camadas inferiores, expondo as foliações na porção superior do talude em seu estado atual conforme mostra a Figura 11, uma característica comum em escorregamentos translacionais. Já a superfície de ruptura inferior, representada no modelo por uma linha inclinada, apresenta um ângulo de  $39^\circ$ , valor estimado com base na análise de imagens do evento e observações de campo.



Figura 11 - Foliações expostas na porção superior da superfície deslizada, talude em estado atual.

### 3.2 Análise Geotécnica

A retroanálise começa com a reconstrução da geometria do talude antes do evento de instabilidade. Em seguida, são levantados os dados geotécnicos, como peso específico, ângulo de atrito e parâmetros de resistência do maciço. Esses dados são então utilizados para análises de estabilidade em softwares como o Slide.

O objetivo da retroanálise é determinar os parâmetros geotécnicos que levaram o talude à condição de ruptura, assumindo um fator de segurança próximo de 1. Inicialmente, são inseridos valores estimados no software para verificação, que são ajustados até se obter um intervalo compatível com a condição de instabilidade observada. Dessa forma, os parâmetros resultantes para  $FS = 1$  refletem aqueles presentes no talude no momento da ruptura, permitindo uma aproximação mais realista das suas condições no instante do colapso.

Para avaliar o talude em questão e realizar uma retroanálise precisa das condições pré-ruptura, foram realizadas análises in loco com o objetivo de reconstruir a geometria do talude e identificar os parâmetros geotécnicos essenciais relacionados

ao momento anterior à ruptura. As análises in loco permitiram uma observação detalhada do terreno e contribuíram para uma visão mais realista da área de estudo.

Além das observações no campo, utilizou-se o Google Earth Pro para auxiliar na reconstrução da configuração do terreno antes do evento de movimentação gravitacional de massa, desencadeado pelas intensas precipitações que ocorreram na região. A partir das imagens históricas disponíveis e dos registros fotográficos anteriores ao evento, foi possível reconstruir a geometria pré-ruptura do talude. Já a geometria pós-ruptura foi levantada a partir de imagens recentes do Google Earth Pro e pelas visitas de campo realizadas, que permitiram caracterizar o estado atual do talude.

Com as geometrias definidas, a retroanálise geotécnica foi realizada com o auxílio do software Slide 2, com o objetivo de identificar os parâmetros críticos de resistência do solo, como o ângulo de atrito ( $\phi$ ), coesão ( $c$ ), GSI e  $m_i$ , por meio do cálculo do fator de segurança (FS) para o talude em condição saturada.

A retroanálise foi conduzida considerando as condições mencionadas e levando em conta as variações nos parâmetros de coesão, ângulo de atrito, GSI e  $m_i$ . Para cada variação desses parâmetros, o fator de segurança foi recalculado até que FS se aproximasse de 1,0, indicando a condição crítica de estabilidade do talude, o ponto em que o talude se tornaria propenso à ruptura.

O fluxograma apresentado na Figura 12 demonstra os passos realizados para a elaboração da retroanálise, juntamente com a avaliação das precipitações do evento.

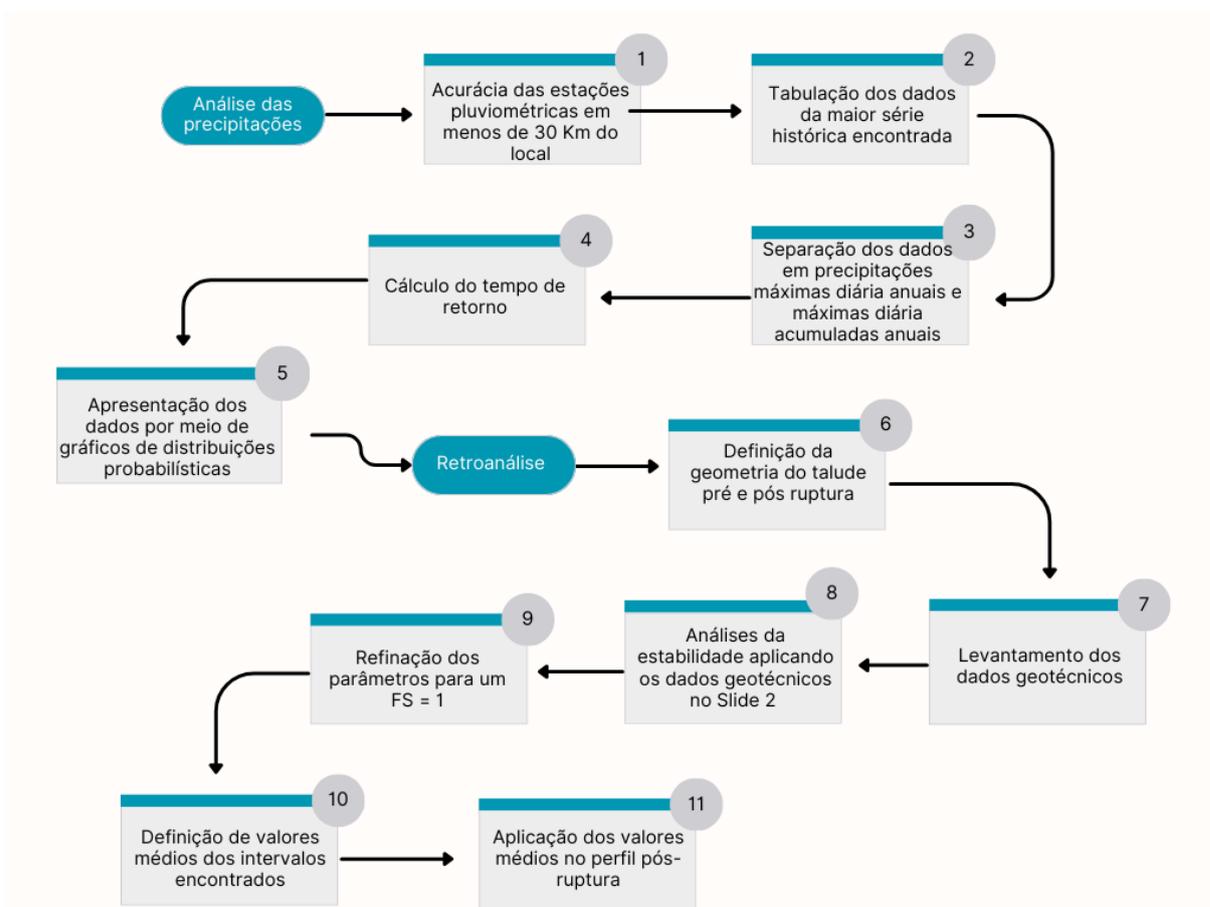


Figura 12 - Passos para elaboração de uma retroanálise em conjunto a avaliação das precipitações que levaram ao evento estudado.

### 3.3 Análise das Precipitações

A análise das chuvas intensas que desencadearam o deslizamento do talude do Morro da Forca permite avaliar seu impacto na estabilidade da encosta. A importância desse estudo é reforçada pelo fato de que o talude sofreu alterações significativas em seu estado devido à ocorrência dessas precipitações. Ouro Preto, de modo geral, apresenta períodos chuvosos expressivos, e uma investigação mais aprofundada desses dados possibilita compreender a intensidade necessária para gerar um evento dessa magnitude. Por isso, a análise das precipitações máximas anuais é fundamental para o estudo.

Para a avaliação das precipitações máximas anuais, estudos da área buscam utilizar dados de estações pluviométricas localizadas a menos de 30 km do local analisado, pois a distância pode influenciar significativamente nas medições. Considerando esse fator, foi escolhida a estação que representasse a maior série histórica disponível, incluindo o ano hidrológico de 2021-2022 e que apresentasse a menor distância possível da área de estudo. Dessa forma, a análise dos parâmetros que contribuíram para o evento extremo de deslizamento torna-se mais precisa e confiável.

Estudos de tempo de retorno é uma metodologia amplamente utilizada para auxiliar na avaliação de riscos de ocorrência de eventos extremos, como as chuvas intensas que ocorreram em 2022 e que podem levar a desastres naturais como os movimentos gravitacionais de massa, a aplicação de distribuições probabilísticas é a metodologia mais aplicada para avaliar estes eventos.

O tempo de retorno é uma forma amplamente utilizada em estudos hidrológicos que nos permite compreender a probabilidade de tais eventos ocorrerem em um determinado período, uma vez que correlaciona a intensidade das precipitações e a frequência de sua ocorrência. Tal correlação é frequentemente representada por meio de gráficos de distribuição probabilística, como foi mencionado anteriormente.

Para o estudo em questão considerou-se os dados pluviométricos da estação meteorológica com maior série histórica e proximidade do local de estudo. Após uma triagem entre as estações pluviométricas nas imediações do Morro da Forca identificou-se a estação mais próxima.

Os dados de precipitação, coletados entre os anos de 1986 e 2023, foram organizados e tabulados no software Excel. A fim de validar os valores de tempo de retorno obtidos nas tabelas de Excel, utilizou-se o software ALEA, que permite aplicar análises probabilísticas nos dados e calcular o tempo de retorno com maior precisão.

Os cálculos de tempo de retorno foram realizados com base nos valores de precipitação máxima diária anual e máxima acumulada anual de 4 dias antecedentes ao evento. A escolha dessa metodologia se justifica pela necessidade de analisar tanto os eventos de precipitação isolados mais intensos (máxima diária) quanto os

eventos prolongados, que podem ter um impacto mais significativo na instabilidade do talude (máxima acumulada de 4 dias). A escolha dos 4 dias antecedentes se baseou em estudos similares que correlacionam as chuvas acumuladas com as máximas anuais, como é o caso do estudo de Amaral (2018).

Para a modelagem dos dados de precipitação, foram utilizadas as distribuições de Gumbel e Generalized Extreme Value. Ambas as distribuições são amplamente utilizadas em estudos de eventos extremos, sendo adequadas para estimar a probabilidade de ocorrência de chuvas intensas e prolongadas, com maior confiabilidade nos cálculos de tempo de retorno e nas projeções de risco.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Análises de Estabilidade

Para a realização de uma retroanálise, é fundamental compreender a geologia da área em questão. A Figura 13 apresenta a litologia do quadrilátero ferrífero, região onde o local de estudo está inserido. Já a Figura 14 mostra uma visão mais detalhada, focando no local específico de interesse.

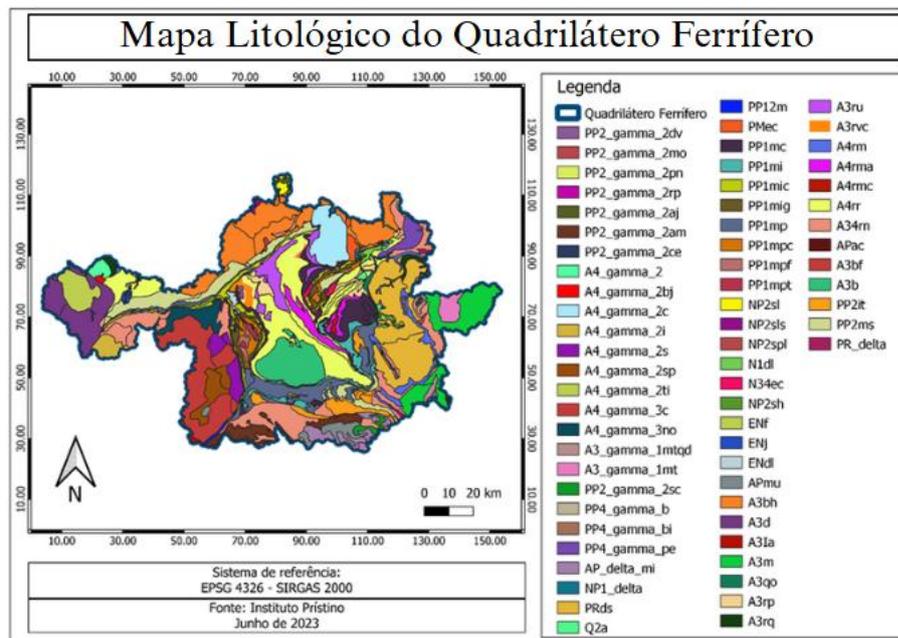


Figura 13 - Mapa da litologia do quadrilátero ferrífero (Fonte: a autora).

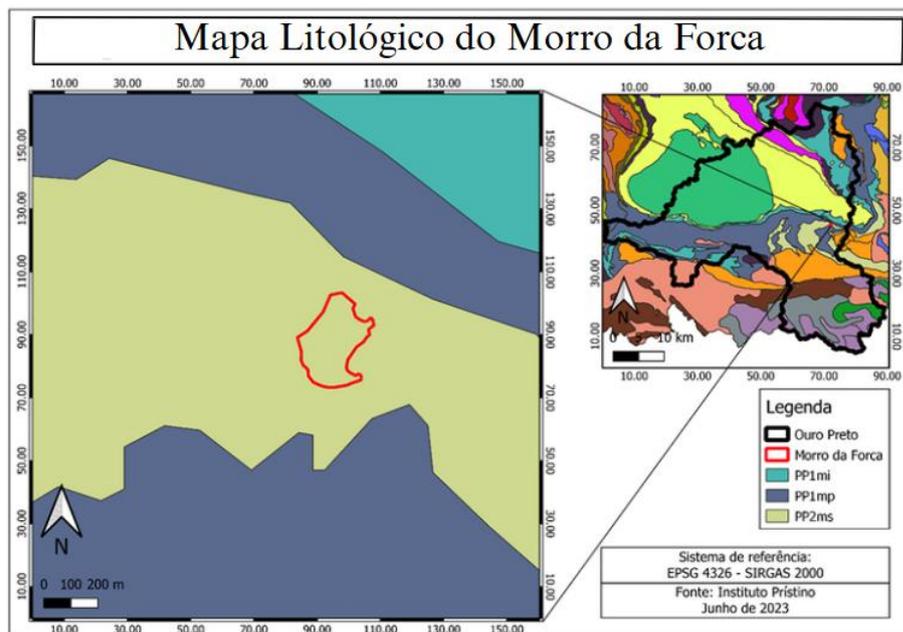


Figura 14 - Mapa da litologia do Morro da Força - Ouro Preto. (Fonte: a autora)

A região onde o MF está localizado é identificada pelo PP2ms, composto por xisto e metagrauvaca do Subgrupo Sabará, conforme ilustrado na Figura 15.

1	PP2ms	Sabará	Grupo	Xisto, Metagrauvaca
104	PP2ms	Sabará	Grupo	Xisto, Metagrauvaca
117	PP2ms	Sabará	Grupo	Xisto, Metagrauvaca
134	PP2ms	Sabará	Grupo	Xisto, Metagrauvaca
159	PP2ms	Sabará	Grupo	Xisto, Metagrauvaca
160	PP2ms	Sabará	Grupo	Xisto, Metagrauvaca
201	PP2ms	Sabará	Grupo	Xisto, Metagrauvaca
211	PP2ms	Sabará	Grupo	Xisto, Metagrauvaca
212	PP2ms	Sabará	Grupo	Xisto, Metagrauvaca

Figura 15 - Descrição da tabela de atributos do mapa de litologia do Quadrilátero Ferrífero (Fonte: Instituto Prístico).

Devido à indisponibilidade de dados específicos sobre o maciço, valores como o peso específico do material foram obtidos a partir da literatura. Fernandes, Sobreira e Gomes (2003) determinaram valores de peso específico para o talude do Morro do

Curral, que está localizado nas proximidades do Morro da Forca. Esses valores estão ilustrados na Figura 16.

Litologia	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	S (%)	e	G <sub>s</sub>
Xisto Cinza	23,0	20,8	10,3	81,2	0,37	2,91
Xisto marrom a avermelhado	23,2	21,3	8,8	71,0	0,37	2,98

Figura 16 - Parâmetros geotécnicos definidos para o Morro do Curral. (Fernandes, Sobreira e Gomes (2003)).

Dessa forma, foi adotado o valor de 23 kN/m<sup>3</sup> para o peso específico do xisto do Morro da Forca. Para a classificação GSI, definiu-se um valor inicial de 25, enquanto a resistência à compressão uniaxial (UCS) da rocha foi considerada em 60 MPa. Além disso, foram atribuídos os valores de *mi* igual a 12 e *D* igual a 0,7, com base nas características observadas no talude. Cabe destacar que esses parâmetros foram estabelecidos com referência às tabelas disponibilizadas pelo software Slide. Com a definição desses parâmetros, foi possível iniciar a retroanálise utilizando o software Slide 2. Uma refinação desses parâmetros foi realizada para ajustar os valores de forma a atingir um fator de segurança igual a 1 ou o mais próximo possível desse valor, de forma que intervalos que representem a real condição do talude em momento de ruptura fossem estabelecidos.

A ação da água em taludes rochosos pode ser representada através de uma abordagem de triangulação, onde a pressão da água sobre a superfície de ruptura é considerada como o empuxo da água. Essa pressão é calculada levando em conta a altura da superfície de ruptura mais inclinada do modelo estudado. A partir dessa altura, a pressão é determinada com base no peso específico da água e na altura da coluna d'água.

A influência da água na estabilidade de taludes rochosos pode ser analisada a partir do conceito de pressão intersticial e empuxo da água, conforme descrito por Freeze e Cherry (1979). A presença de água nos fraturamentos da rocha gera poro-pressões que reduzem a resistência ao cisalhamento ao longo das superfícies de

descontinuidade, podendo levar à instabilidade do maciço. Assim como nas descontinuidades a água exerce essa mesma função sobre as foliações, como foi o caso estudado e devido a este fator o deslizamento foi observado com a mesma angulação destas foliações.

A distribuição da pressão da água dentro do talude pode ser representada na forma de um triângulo de pressão, conforme representado na Figura 17, onde a magnitude do empuxo é determinada pela altura da superfície freática em relação à superfície de ruptura. Desta forma, aplicando essa relação ao modelo estudado tem-se:

$$P_{\text{água}} = \gamma_{\text{água}} \times h \quad \text{Equação 10}$$

Onde  $\gamma$  é o peso específico da água e  $h$  é a altura da superfície de ruptura.

$$P_{\text{água}} = 9,81 \times 24,483 = 240,18 \text{ KN/m}^2$$

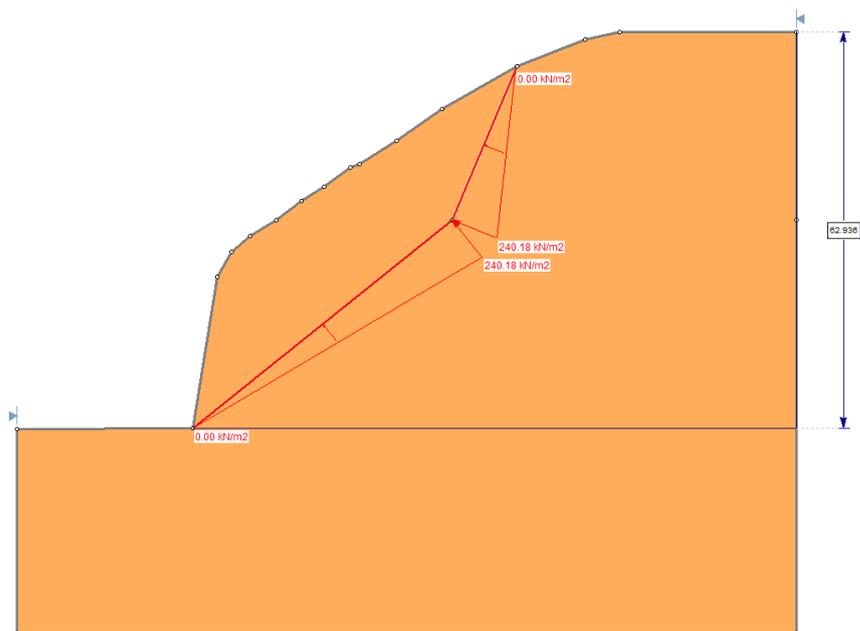


Figura 17 – Aplicação do triângulo de pressão da água.

Para avaliação da estabilidade foram aplicados os métodos de Bishop Simplificado com o critério de Mohr-Coulomb e Janbu Simplificado pelos critérios de Mohr-Coulomb e Hoek e Brown.

Na avaliação utilizando o método de Bishop Simplificado, observou-se que o modelo não se aplicou corretamente, pois os resultados indicaram valores de coesão extremamente elevados, conforme é apresentado na Tabela 4, que não condizem com os valores encontrados na literatura para os xistos do Quadrilátero Ferrífero. Como apresentado na pesquisa de Souza et al. (2024), que compilou os valores de coesão provenientes de diversos estudos sobre os xistos dessa região, os resultados mostraram uma variabilidade considerável. Contudo, os valores apresentados no compilado para coesão se mantiveram dentro de um intervalo de aproximadamente 15 kPa a 120 kPa.

Tabela 4 - Intervalo de valores de coesão e ângulo de atrito encontrados pelo método de Bishop Simplificado para o xisto do Morro da Forca.

Intervalo de Valores	
c (KPa)	Phi (°)
9792	27
8073	17

A avaliação da estabilidade por meio do método de Janbu Simplificado e pelos critérios de Mohr-Coulomb e Hoek e Brown, apresentou resultados coerentes para uma aplicação de duas fatias. Com o objetivo de aumentar a acurácia dos parâmetros, foi realizada uma análise probabilística com distribuição uniforme dos dados, uma vez que esse método considera inúmeras variações nos parâmetros, resultando em uma maior variabilidade de valores, os quais correspondem a um fator de segurança de 1. Vale ressaltar que a análise probabilística também foi aplicada no método de Bishop Simplificado.

Para o critério de Hoek e Brown os valores de GSI e  $m_i$  apresentaram um intervalo demonstrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Intervalo de valores de GSI e  $m_i$  encontrados pelo método de Janbu Simplificado para o xisto do Morro da Forca.

Variação	
GSI	$m_i$
35	18

30	9
----	---

Para o critério de Mohr-Coulomb os valores de c e Phi apresentaram um intervalo demonstrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Intervalo de valores de coesão e ângulo de atrito encontrados pelo método de Janbu Simplificado para o xisto do Morro da Forca.

Variação	
Phi	c
28	193
16	168

Nos gráficos apresentados na Figura 18 e Figura 19 os valores de coesão, ângulo de atrito,  $m_i$  e GSI correspondentes aos fatores de segurança próximos de 1 estão representados por diferentes cores. O objetivo desses gráficos é ilustrar o comportamento desses parâmetros em relação aos diferentes valores de FS, permitindo uma análise visual da sua influência na estabilidade do talude.

Vale ressaltar que, para fins de interpretação, os valores de FS entre 0,98 e 1,02 podem ser considerados equivalentes a 1, refletindo a condição crítica desejada de estabilidade do talude.

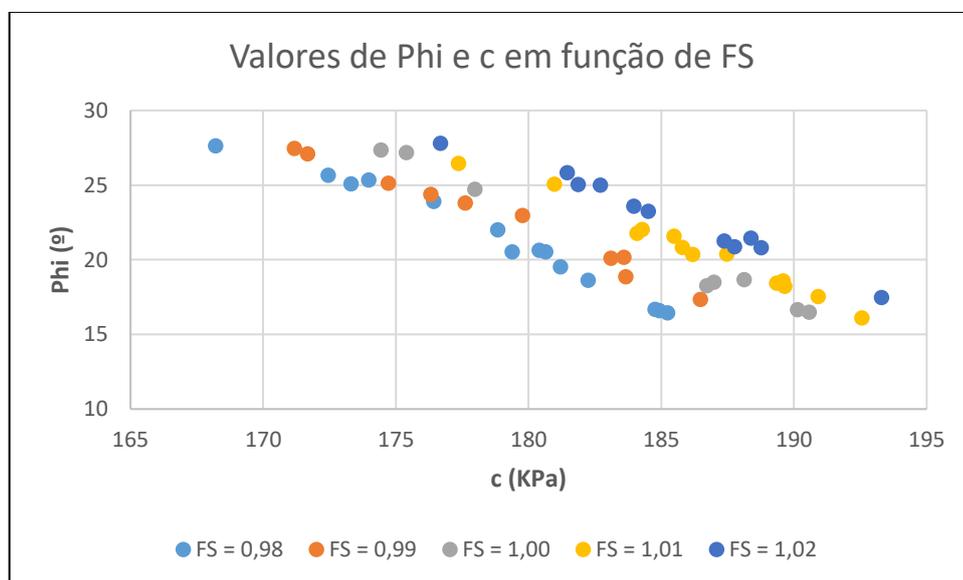


Figura 18 - Gráfico de coesão e ângulo de atrito em função de FS pelo método de Janbu Simplificado e critério de Mohr-Coulomb para o xisto do Morro da Forca.

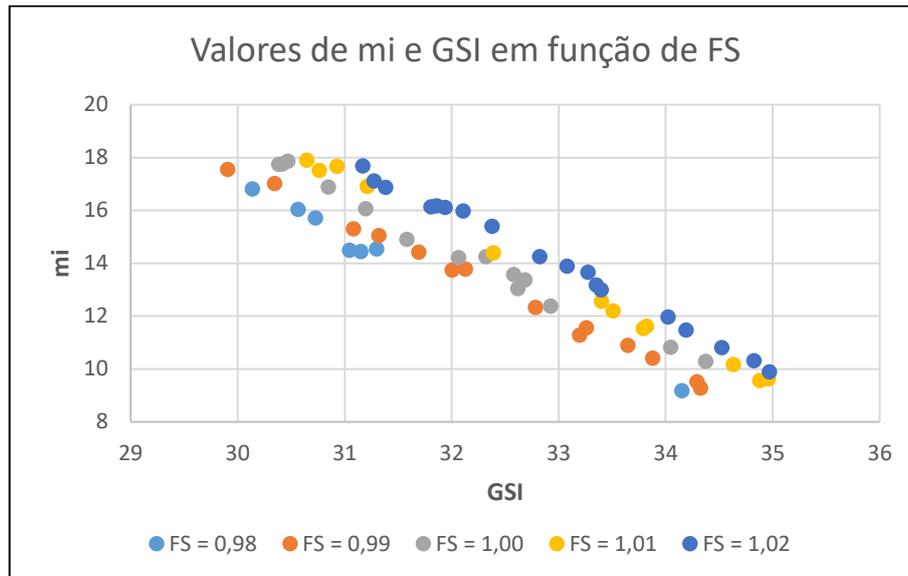


Figura 19 - Gráfico de  $m_i$  e GSI em função de FS pelo método de Janbu Simplificado e critério de Hoek-Brown para o xisto do Morro da Forca

A partir dos intervalos definidos foram estabelecidos valores médios para coesão, ângulo de atrito, GSI e  $m_i$ , conforme apresentados na Tabela 7. Esses valores foram determinados com base nos resultados das análises de estabilidade e empregados na geometria pós-ruptura, visando avaliar a condição atual do talude e concluir a retroanálise.

Tabela 7 - Valores médios definidos para coesão, ângulo de atrito, GSI e  $m_i$ .

Valores médios	
<b>GSI</b>	32
<b><math>m_i</math></b>	14
<b>Phi</b>	22
<b>c</b>	183

Os valores de coesão obtidos pelo método de Janbu estão em conformidade com os dados compilados na pesquisa de Souza et al. (2024). Embora os valores excedam 120 kPa, a variação observada foi pequena. Além disso, a pesquisa destaca a alta variabilidade dos valores de coesão para os xistos do Quadrilátero Ferrífero, o que reforça a coerência dos resultados obtidos.

Os valores de GSI obtidos pelo critério de Hoek e Brown apresentam uma leve divergência em relação aos encontrados por Santos (2015), que classificou o xisto do

Subgrupo Sabará no bairro Cabanas, em Mariana – MG, uma região próxima a Ouro Preto. Em sua pesquisa, a autora identificou valores de GSI de até 25, que, embora distintos, ainda se aproximam dos valores médios obtidos para o xisto do Morro da Forca.

Os valores obtidos foram aplicados no modelo pós-ruptura para verificar a estabilidade do maciço com sua geometria atual. Para isso, foram analisadas duas condições de superfície de ruptura. Inicialmente, considerou-se uma ruptura mais superficial, associada a um possível deslizamento translacional, em razão das características observadas no evento de 2022. Em seguida, foram analisadas rupturas circulares, permitindo uma busca mais ampla por superfícies de falha. Essa abordagem considerou o comportamento do material de forma semelhante ao de um solo, dado seu alto grau de fraturamento e perturbação após o evento estudado. Assim, o nível freático pôde ser avaliado conforme os critérios aplicados a solos, utilizando a *water table line* pré-definida no software Slide 2.

Para o critério de Mohr-Coulomb, considerando uma superfície de ruptura sugestiva de um deslizamento translacional, obteve-se um fator de segurança de 3,09, conforme mostra a Figura 20. Neste modelo aplicaram-se as cargas de pressão de água considerando toda a altura do talude, uma vez que a superfície de ruptura sugerida se estende desde o topo ao pé do talude. O valor de FS encontrado indica que o talude se encontra estável para uma condição saturada.

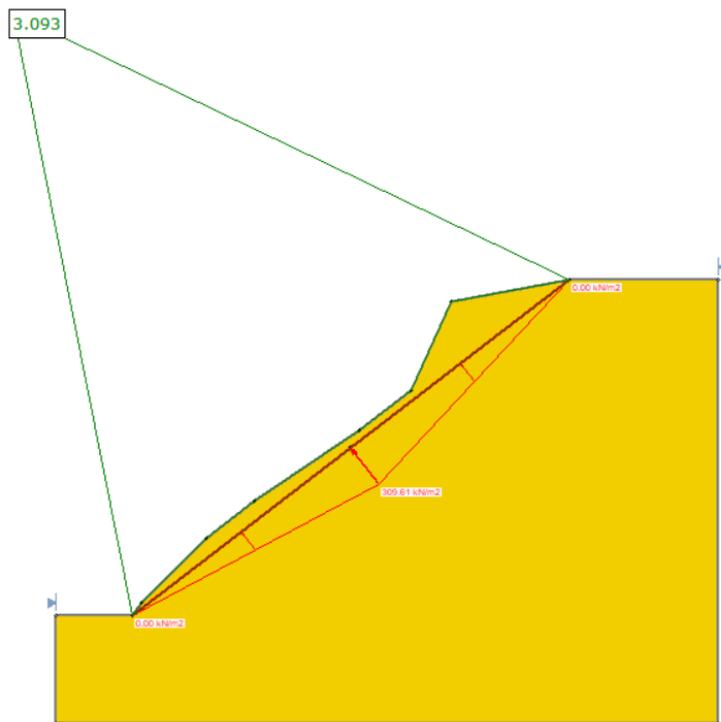


Figura 20 - Análise de estabilidade para uma ruptura planar pelo método de Janbu Simplificado e pelo critério de Mohr-Coulomb.

Na avaliação de rupturas circulares pelo critério de Mohr-Coulomb, identificaram-se superfícies com um fator de segurança alto, sendo o menor deles de 1,54, como é apresentado na Figura 21. A análise revelou diversas superfícies de ruptura circulares, sendo a maioria delas destacadas pelas colorações amareladas, que indicam fatores de segurança em torno de 1,5.

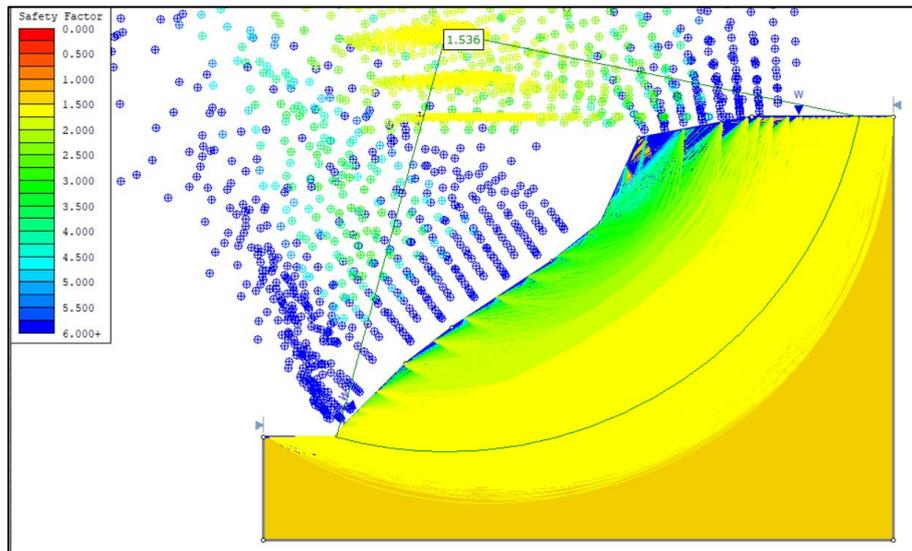


Figura 21 - Análise de estabilidade para uma ruptura circular pelo método de Janbu Simplificado e pelo critério de Mohr-Coulomb.

Para a superfície de ruptura planar, considerando o critério de Hoek e Brown, obteve-se um fator de segurança de 3,22, conforme a Figura 22, indicando uma condição estável.

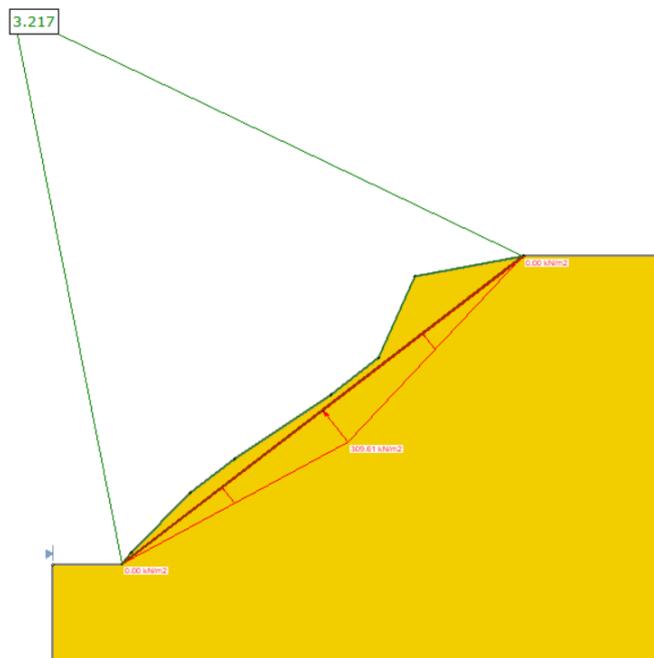


Figura 22 - Análise de estabilidade para uma ruptura planar pelo método de Janbu Simplificado e pelo critério de Hoek e Brown.

Para o critério de Hoek e Brown, considerando superfícies de ruptura circulares, observaram-se fatores de segurança estáveis, predominando nas regiões indicadas pelas colorações verdes e azul, conforme a Figura 23.

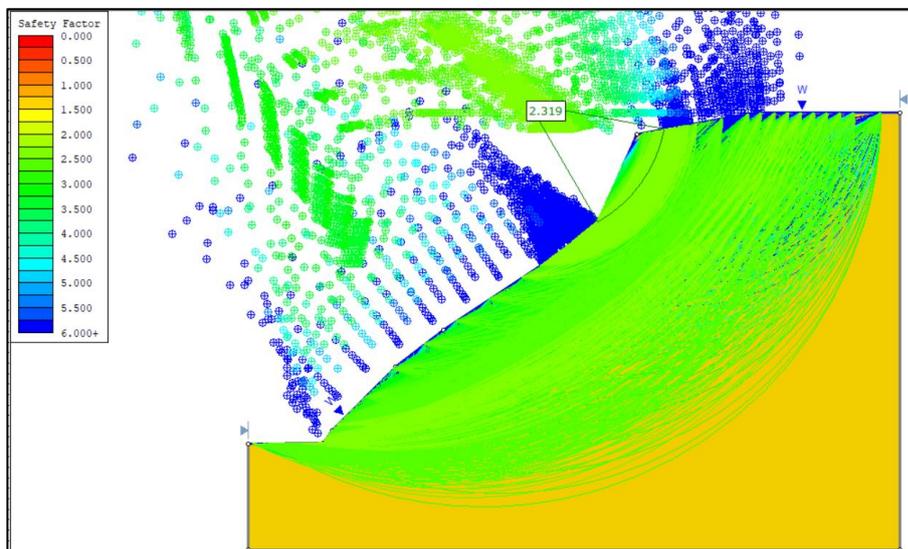


Figura 23 - Análise de estabilidade para uma ruptura circular pelo método de Janbu Simplificado e pelo critério de Hoek e Brown.

De acordo com a NBR 11.682, taludes rodoviários com alto risco à vida humana devem apresentar um fator de segurança mínimo de 1,5. No entanto, os valores obtidos para a condição saturada, segundo as condições coletadas que o talude apresentou em março de 2025, ficaram acima desse limite, indicando que o talude se encontra estável com as condições estabelecidas. Vale ressaltar que o talude passou por remoções de terra e pequenas alterações em sua geometria, o que pode ter influenciado em sua estabilidade.

#### 4.2 Análises das Precipitações Máximas Anuais

A avaliação das precipitações máximas anuais, em conjunto com a retroanálise, é fundamental para entender as características da chuva que desencadeou o deslizamento estudado. Esse estudo permite uma compreensão mais detalhada das condições do talude no momento da ruptura, complementando a retroanálise. Além disso, a análise da intensidade da precipitação é essencial para estimar o nível de saturação do talude no instante do evento.

Para que a avaliação do tempo de retorno fosse possível estabeleceu-se a estação 2043056, por ser a estação com maior período de dados registrados e com maior proximidade do local de estudo. A estação está localizada a 14,97 Km de distância do Morro da Forca, conforme ilustra a Figura 24, esta distância ainda se encaixa na máxima de 20 Km definidos por Freitas et al. (2021), que mostraram em sua pesquisa que essa distância é recomendada para implantação de pluviômetros de forma a garantir uma maior confiabilidade nos dados.

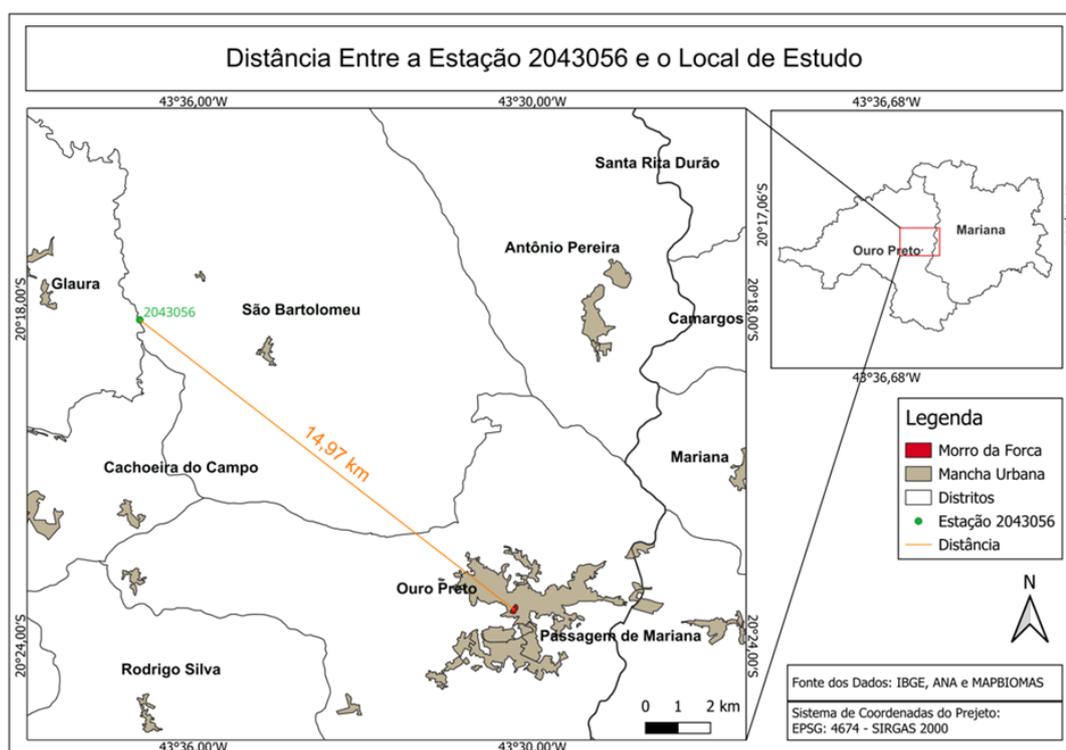


Figura 24 - Mapa da distância entre a estação 2043056 e o Morro da Forca (Fonte: a autora).

O estudo foi então subdividido em duas análises das precipitações, sendo elas das máximas diárias acumuladas anuais de 4 dias antecedentes e as máximas diárias anuais. Desta forma, a subdivisão permite compreender a influência que as chuvas acumuladas exercem sobre os movimentos gravitacionais de massa, sobretudo a influência no evento estudado em comparação a análise apenas da máxima diária anual.

#### 4.2.1 Análise da Precipitação Máxima Acumulada Anual de 4 Dias Antecedentes

O gráfico da Figura 25 apresenta os tempos de retorno para a máxima precipitação acumulada anual em um período de quatro dias antecedentes, considerando a distribuição Generalized Extreme Value (GEV). A estimativa dos tempos de retorno foi realizada por meio do software ALEA, que também permitiu a verificação do p-valor, um indicador estatístico da aderência do modelo aos dados observados. Valores de p-valor mais próximos de 1 indicam um melhor ajuste da distribuição à série histórica analisada, conforme apresentado na Tabela 8. As distribuições foram aplicadas em ambas as análises para fornecer uma melhor visualização dos dados através de gráficos.

Tabela 8 - Valores de P-Valor para as distribuições Gumbel e GEV aplicadas aos dados de tempo de retorno da série histórica das máximas precipitações acumuladas anuais antecedentes, pelo método de Kolmogorov-Smirnov.

P-Valor para as distribuições Gumbel e GEV	
Gumbel (MML)	0,90
GEV (MML)	0,98

Dessa forma, verifica-se que a distribuição GEV, utilizando o método da Máxima Verossimilhança (MML), apresenta a melhor adequação aos dados de precipitação.

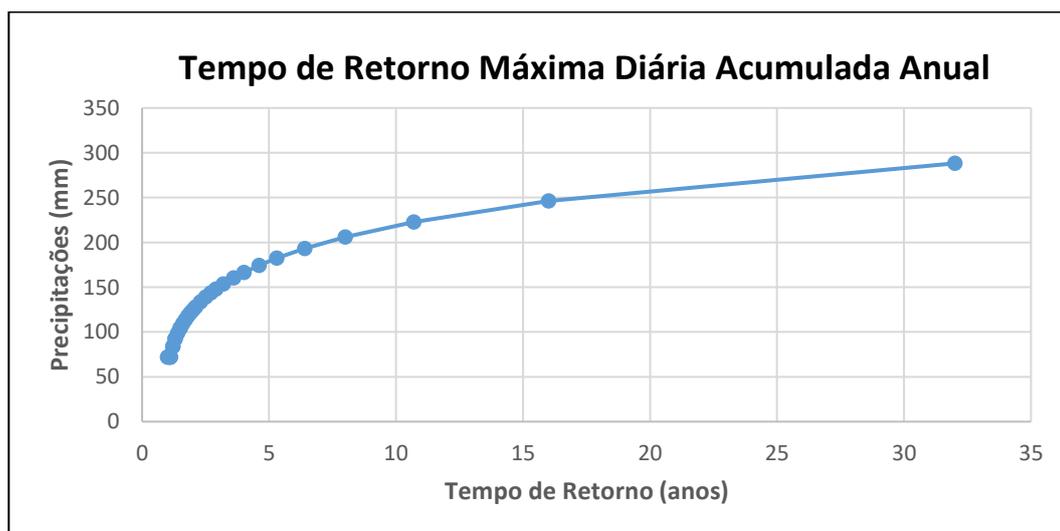


Figura 25 - Gráfico do tempo de retorno das precipitações máximas diárias acumuladas anuais de 4 dias antecedentes em função das precipitações pelo método de GEV.

Tabela 9 - Cálculos do tempo de retorno para as chuvas máximas acumuladas anuais de 4 dias antecedentes.

Ano Hidrológico	Máxima Diária Acumulada Anual de 4 Dias Antecedentes	m (nº de ordem)	$P = \frac{m}{n+1}$	$TR = \frac{n+1}{m}$
2021 - 2022	295,9	1	0,03	32,0
2019 - 2020	217,1	2	0,06	16,0
1999 - 2000	175,9	3	0,09	10,7
1996 - 1997	172,7	4	0,13	8,0
2011 - 2012	172,4	5	0,16	6,4
2008 - 2009	162,2	6	0,19	5,3
1991 - 1992	158,6	7	0,22	4,6
2005 - 2006	145,2	8	0,25	4,0
1995 - 1996	136,1	9	0,28	3,6
2003 - 2004	119,1	10	0,31	3,2
2004 - 2005	116,1	11	0,34	2,9
1990 - 1991	113,6	12	0,38	2,7
2010 - 2011	106,9	13	0,41	2,5
2015 - 2016	106,2	14	0,44	2,3
2001 - 2002	98,8	15	0,47	2,1
2014 - 2015	93,1	16	0,50	2,0
2012 - 2013	88,9	17	0,53	1,9
1984 - 1985	88,3	18	0,56	1,8
2000 - 2001	86,7	19	0,59	1,7
2020 - 2021	77	20	0,63	1,6
1997 - 1998	74,6	21	0,66	1,5
2017 - 2018	72,5	22	0,69	1,5
2009 - 2010	71,8	23	0,72	1,4
2016 - 2017	66,5	24	0,75	1,3
2007 - 2008	65,9	25	0,78	1,3
2022 - 2023	63,9	26	0,81	1,2
2013 - 2014	63,6	27	0,84	1,2
2002 - 2003	60,9	28	0,88	1,1
1998 - 1999	59,1	29	0,91	1,1
2006 - 2007	58	30	0,94	1,1
1988 - 1989	45,4	31	0,97	1,0
2018 - 2019	42,7	32	1	1,0

\*Em que n é o número total de observações da série histórica, n = 32.

A análise das precipitações máximas acumuladas em quatro dias antecedentes ao evento revela que, no ano hidrológico de 2021-2022, os valores registrados foram excepcionalmente elevados, atingindo 295,9 mm. Esse volume está associado a um tempo de retorno de 32 anos, caracterizando um evento extremo em termos estatísticos. Além disso, esse tempo de retorno de 32 anos significa que em cada ano hidrológico existe a probabilidade de 1/32 de que esse evento venha a ocorrer ou ser superado, ou seja, em todos os anos existe a probabilidade de que ele venha a ocorrer ou ser superado, esta probabilidade é apenas menor que as demais por ser um evento raro.

Ao comparar esses dados com os níveis de alerta estabelecidos pela Defesa Civil de Ouro Preto, observa-se que, mesmo com a consideração de um período reduzido de análise, a precipitação registrada superou significativamente o limite máximo do alerta extremo. Esse resultado sugere um aumento na frequência e intensidade de desastres naturais, corroborando os achados de D'Orsi et al. (2000), que associam eventos pluviométricos extremos a uma maior incidência de movimentos gravitacionais de massa. A intensificação desses processos implica um aumento na magnitude dos deslizamentos e de seus impactos, reforçando a necessidade de medidas preventivas e aprimoramento dos sistemas de alerta e resposta.

#### **4.2.2 Análise da Precipitação Máxima Diária Anual**

Para a máxima precipitação diária anual, também foram utilizados os métodos de Gumbel e Generalized Extreme Value pelo método da Máxima Verossimilhança (MML). A distribuição GEV novamente apresentou o melhor ajuste aos dados, sendo os resultados apresentados na Figura 26 e na Tabela 10 (p-valor). Na Tabela 11 são apresentados os resultados para a análise realizada no excel, considerando apenas a posição de plotagem dos dados.

Tabela 10 - Valores de P-Valor para as distribuições Gumbel e GEV aplicadas aos dados de tempo de retorno da série histórica das máximas precipitações diárias anuais, pelo método de Kolmogorov-Smirnov.

<b>P-Valor para as distribuições Gumbel e GEV</b>	
Gumbel (MML)	0,42

GEV (MML)	0,99
-----------	------

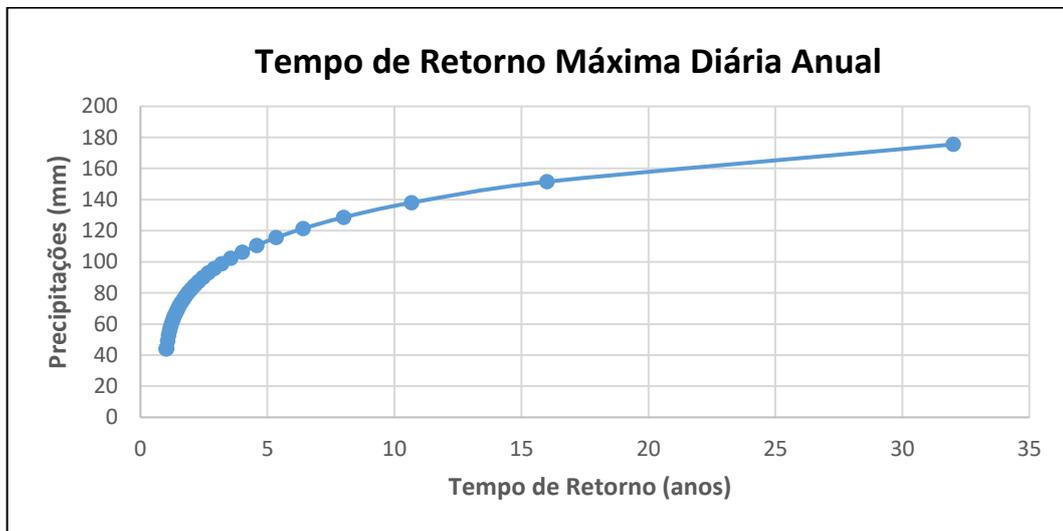


Figura 26 - Gráfico do tempo de retorno das precipitações máximas diárias anuais em função das precipitações pelo método de GEV.

Tabela 11 - Cálculos do tempo de retorno para as chuvas máximas diárias anuais.

Ano Hidrológico	Máxima Diária Anual	m (nº de ordem)	$P = \frac{m}{n+1}$	$TR = \frac{n+1}{m}$
2019 - 2020	175,5	1	0,03	32,0
2021 - 2022	170,2	2	0,06	16,0
2011 - 2012	110,2	3	0,09	10,7
1999 - 2000	105,5	4	0,13	8,0
1995 - 1996	99	5	0,16	6,4
2010 - 2011	92,5	6	0,19	5,3
1996 - 1997	89,4	7	0,22	4,6
2000 - 2001	86,7	8	0,25	4,0
1991 - 1992	75,2	9	0,28	3,6
1984 - 1985	74,4	10	0,31	3,2
1990 - 1991	74,2	11	0,34	2,9
2017 - 2018	72,5	12	0,38	2,7
2005 - 2006	69,5	13	0,41	2,5
2003 - 2004	69	14	0,44	2,3
2009 - 2010	67,7	15	0,47	2,1
2014 - 2015	66,5	16	0,50	2,0
2001 - 2002	66,3	17	0,53	1,9
2004 - 2005	62,1	18	0,56	1,8

2008 - 2009	60,7	19	0,59	1,7
2002 - 2003	59,3	20	0,63	1,6
2007 - 2008	58,7	21	0,66	1,5
2020 - 2021	56,2	22	0,69	1,5
1998 - 1999	54	23	0,72	1,4
1997 - 1998	52,3	24	0,75	1,3
2006 - 2007	51,5	25	0,78	1,3
2022- 2023	51,3	26	0,81	1,2
2016 - 2017	50	27	0,84	1,2
2012 - 2013	49,7	28	0,88	1,1
2015 - 2016	48,5	29	0,91	1,1
2018 - 2019	42,7	30	0,94	1,1
2013 - 2014	41,3	31	0,97	1,0
1988 - 1989	39,3	32	1	1,0

A análise das chuvas máximas diárias anuais, conforme apresentado na Tabela 11, indica que, no ano hidrológico de 2021-2022, o tempo de retorno foi estimado em 16 anos, um valor relativamente elevado. Esse tempo de retorno nos diz que a probabilidade deste evento vir a ocorrer ou ser superado é de 1/16, em cada ano. A precipitação extrema registrada nesse período superou 128 mm em um único dia, ultrapassando o limiar de alerta extremo para cinco dias de chuva acumulada. Embora eventos isolados de precipitação não sejam determinantes para a ocorrência de movimentos gravitacionais de massa, esse volume significativo destaca a necessidade de monitoramento contínuo.

A análise também revelou que o tempo de retorno de 32 anos, estimado para o ano hidrológico de 2019-2020, não esteve associado a grandes eventos geotécnicos, evidenciando que a chuva máxima diária isolada não é um indicador suficiente de risco. Dessa forma, a consideração das chuvas acumuladas ao longo de períodos mais extensos torna-se essencial para a avaliação de instabilidade geotécnica. Apesar da diferença de apenas 5,3 mm entre os volumes máximos diários de 2019-2020 e 2021-2022, a frequência de eventos geotécnicos foi significativamente maior no último período, indicando a influência de outros fatores na deflagração desses processos.

Diante desse cenário, ressalta-se a importância da atuação da Defesa Civil de Ouro Preto na gestão de riscos, especialmente por meio de seu sistema de alerta de

chuvas. A superação do limite crítico de precipitação diária reforça a necessidade de um planejamento preventivo eficaz, incluindo a emissão de alertas antecipados, a adoção de medidas estruturais e não estruturais de mitigação e a adaptação da infraestrutura urbana para reduzir impactos. A integração de dados hidrometeorológicos aos protocolos de resposta emergencial é fundamental para aprimorar a capacidade de gestão municipal e minimizar os danos humanos e materiais decorrentes de eventos de precipitação extrema.

Por fim, destaca-se os valores de tempo de retorno da máxima precipitação diária anual estimados por meio do software ALEA foram compatíveis com aqueles obtidos por meio do software Excel, demonstrando coerência entre as abordagens utilizadas para a análise estatística das precipitações.

## 5 CONCLUSÃO

Os tempos de retorno estimados neste estudo, associados ao evento extremo de precipitação que desencadeou o movimento gravitacional de massa ocorrido no Morro da Forca, em Ouro Preto, apresentam valores elevados, ressaltando a necessidade de considerar não apenas a precipitação diária isolada, mas também o acúmulo pluviométrico antecedente. A inclusão das chuvas dos dias anteriores na análise resultou na duplicação do tempo de retorno, evidenciando sua influência na saturação do solo e na estabilidade dos taludes. Esse fenômeno é de particular relevância, uma vez que a saturação impacta diretamente os parâmetros geotécnicos do maciço, reduzindo sua resistência ao cisalhamento e aumentando a suscetibilidade a rupturas.

Os resultados indicam que a consideração exclusiva da precipitação máxima diária pode levar à subestimação dos riscos geotécnicos, tornando indispensável a inclusão da chuva acumulada em estudos de estabilidade e no dimensionamento de sistemas de drenagem. Essa abordagem possibilita uma avaliação mais realista das condições do terreno e uma previsão mais precisa de cenários críticos, contribuindo para a implementação de medidas preventivas mais eficientes e eficazes.

Adicionalmente, a retroanálise realizada, com base nos parâmetros de coesão, ângulo de atrito, GSI e  $m_i$ , demonstrou que os fatores de segurança obtidos para a situação saturada indicam que o talude se encontra estável, uma vez que os fatores de segurança obtidos ficaram acima do valor mínimo recomendado pela NBR 11.682 para taludes rodoviários de alto risco ( $FS \geq 1,5$ ).

A correlação entre a saturação do solo e a estabilidade do talude torna-se evidente ao se considerar que a ruptura ocorreu no momento mais crítico do ano hidrológico de 2021-2022. A intensidade das chuvas que antecederam o evento teve papel determinante no processo de instabilização, o que demonstra a importância de se considerar a precipitação acumulada e os tempos de retorno na avaliação da estabilidade de taludes. No caso específico do Morro da Forca, o tempo de retorno estimado foi significativamente elevado, evidenciando a raridade do evento pluviométrico e seu impacto nos parâmetros geotécnicos analisados.

Portanto, fica evidente a necessidade de atenção às condições climáticas para a prevenção de futuros deslizamentos. A análise das condições atuais do talude revelou uma situação estável, porém, vale ressaltar que a avaliação realizada considera a superfície do talude onde o evento já ocorreu, ignorando as seções adjacentes que apresentam inclinações mais acentuadas.

## REFERÊNCIAS

AMARAL, Ana Maria Carrascosa do. *Análise estatística da precipitação relacionada à ocorrência de movimentos de massa em Cubatão - SP*. 2018. Doutorado em Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2018.

Alves, A. V. P.; da Silva Santos, G. B.; de Menezes Filho, F. C. M.; Sanches, L. *Análise dos métodos de estimação para os parâmetros das distribuições de Gumbel e GEV em eventos de precipitações máximas na cidade de Cuiabá-MT*, 2013.

Augusto Filho, O.; Virgili, J. C. (1998) Estabilidade de Taludes. In: Oliveira, A. S.; Brito, S. N. A. (Eds). *Geologia de Engenharia*. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), São Paulo.

Bastos, F.H., 2012. *Movimentos de massa no maciço de Baturité (CE) e contribuições para estratégias de planejamento ambiental*. Tese (Doutorado em Geografia). Fortaleza, Universidade Federal do Ceará.

BACK, A.J.; HENN, A. & OLIVEIRA, J.L.R. Heavy rainfall equations for Santa Catarina, Brazil. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:2127-2134, 2011.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (Org.) *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos/Editora Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

BISHOP, A. W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, v. 5, n. 1, p. 7-17, 1954.

BISHOP, A. W., 1955, The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Earth Slopes, *Geotéchnique*, vol. 5, n.1, pp. 7-17.

BRETAS, T. C. *Retroanálise Probabilística Tridimensional Por Equilíbrio-limite De Rupturas De Talude em Belo Horizonte/MG*. Ouro Preto, 2020. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)–Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia.

CASTRO, C. C. Os deslizamentos de terra em Ouro Preto, MG, e suas implicações para o planejamento urbano. 2006.

CASTRO, J. M. G. (2006). Pluviosidade e movimentos de massa nas encostas de Ouro Preto. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia Civil. 129p.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Ação Emergencial para Reconhecimento de Áreas de Alto e Muito Alto Risco a Movimentos de Massa e Enchentes: Ouro Preto, MG. 2016.

DELMONACO, G., IPPOLITO, F., MARGOTTINI, C. (1995). The CEC Project. Meteorological Factors influencing slope stability and slope movement type: evaluation of hazard prone areas. Proc. 1st Review Meeting of Hydrological and Hidrogeological Risks. Brussels, p. 259-283, editado por R. Casale, Official Publications of European Communities. Bruxelas.

D'ORSI R.N., FEIJÓ R.L. and PAES, N.M. (2000). Rainfall and Mass Movements in Rio de Janeiro. Proceedings of 31nd International Geological Congress, Rio de Janeiro, Brasil.

ELTZ, F.L.F.; REICHERT, J.M. & CASSOL, E.A. Período de retorno de chuvas em Santa Maria, RS. R. Bras. Ci. Solo, 16:265-269, 1992.

FILHO, A. O.; VIRGILI, J. C. (1998). "Estabilidade de taludes, Cap. 15 - Geologia de Engenharia". Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, ABGE. Editora Oficina de textos, pp. 243-269.

FELLENIOUS, W. Results from Swedish slope stability investigations. Geotekniska Sällskapet Proceedings, 1936

Fernandes, F., Cerri, L. Elaboração da Carta Geotécnica de Suscetibilidade de um Trecho Da Rodovia Marechal Rondon - SP-300 (SP, Brasil). Geosciences Geociências, Brasil, v. 30, n. 3,. p.456-465, 2011.

Fernandes, G.; Sobreira, F.; Gomes, R. Modelação geomecânica e propostas de estabilização da encosta do Morro do Curral - Ouro Preto/Brasil. *Geotecnia*, n.º 97, p. 15-24, 2003.

FERREIRA, Sueli Batista; LANA, Milene Sabino; CONTE JR., Artur Antônio; LEITE, Leonardo de Freitas. Movimentos em encostas de Ouro Preto, MG - o caso da Vila São José. *REM - Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, v. 57, n. 4, p. 235-240, out./dez. 2004.

FIORI, Alberto Pio. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2015.

Fiori, A. P.; Carmignani, L. 2009. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes. 2ª. ed. Curitiba: Editora UFPR, 604 p.

FIORI, A. P.; WANDRESEN, R. Tensões e deformações em geologia. 2014.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. *Groundwater*. 2. ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1979.

FREDLUND, D. G.; KRAHN, J. Comparison of slope stability methods. *Canadian Geotechnical Journal*, n. 14, p. 429-439, 1977.

FREIRE, F. G. C. et al. Estudo das precipitações máximas para o município de Mossoró-RN, Brasil. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 6, n. 1, p. 3– 7, 2012.

FREITAS, Emerson da Silva; LEMOS, Filipe Carvalho; ALMEIDA, Cristiano das Neves; COELHO, Victor Hugo Rabelo; FILHO, Geraldo Moura Ramos; MEIRA, Marcela Antunes; SILVA, Abner Lins. *Análise da correlação da precipitação entre pluviômetros em diferentes escalas temporais*. XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2021.

INFANTI JR., N.; FORNASARI FILHO, N. Processos de Dinâmica Superficial. In: Oliveira, A. M. S.; Brito, S. N. de (orgs.) *Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE, 1998.

GERSCOVICH, Denise M. S.. Estabilidade de Taludes. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

Guidicini, G.; Nieble, C. M. (1984) Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação, 2nd ed.

Gomes. C. L. R., 2003. Retroanálise em estabilidade de taludes em solo: metodologia para obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento. Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

HOEK, E. (1997). Rockfall - A program in basic for the analysis of rockfalls from slopes.

Hoek, E. Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal*, v. 2, n. 2, p. 4–16, 1994.

HOEK, E. (2000). Practical Rock Engineering. Edition by Dr. E. Hoek, 2000.

HOEK, E.; TORRES, C. C.; CORKUN, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. 7p.

Hoek, E. (2007). Practical Rock Engineering. Canadá.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2022). Censo demográfico. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/ouro-preto.html>.

JANBU, N. Slope stability computations. In: Embankment Dam Engineering: Casagrande Volume. New York: John Wiley & Sons, 1973.

JORNAL HORA DO POVO. *MG: Morro da Força desmorona e destrói casarões no centro histórico de Ouro Preto*. Disponível em: <https://horadopovo.com.br/mg-morro-da-forca-desmorona-e-destroi-casaro-es-no-centro-historico-de-ouro-preto/>.

Lacerda, W. A. 2002. Comportamento Geotécnico de Massas Coluviais. 3º Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica as Região Sul (3º GEOSUL), Joinville (SC). Anais: ABMS.

LAMBE, T. W. & WHITMAN, R. V., 1969. Soil Mechanics (SI Version ed.). New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.

MAIA, P. C. A.; SAYÃO, A. S. F. J.; SALLES, R. O. Aplicação de retroanálise probabilística para avaliação da estabilidade de taludes, 2000.

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

MASSAD, F. Obras de Terra: curso básico de geotecnia. Editora Oficina de Textos. São Paulo. 2003.

MELLO, C. R.; SILVA, A. M. Métodos estimadores dos parâmetros da distribuição de Gumbel e sua influência em estudos hidrológicos de projeto. 2005.

MEIER, A. L.; TABALIPA, L. K.; FARO, V. P. Aplicação de uma metodologia de retroanálise em um talude em São José dos Pinhais. In: GEOSUL 2019 – XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul, 17 a 19 de outubro de 2019, Joinville, SC. Anais [...]. São Paulo: ABMS, 2019.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. The analysis of the stability of general slip surfaces. Geotechnique, v. 15, n. 1, p. 79-93, 1965.

OLIVEIRA, Alisson Souza de; MELLO, Carlos Rogério de; FRANCO, Camila Silva; MARQUES, Rosângela Francisca de Paula Vitor; SILVA, Antônio Marciano da. Aplicabilidade da distribuição GEV ao estudo da precipitação máxima diária anual na região sul de Minas Gerais. 2014.

Quadros, S.; Queiroz, P. I. B.; Vilas Boas, M. A. Avaliação de Métodos de Estimativa da Evapotranspiração de Referência no Semiárido Pernambucano. 2011.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. Hidrologia Estatística, CPRM, Belo Horizonte, 552 p. 2007.

NOGUEIRA, Renan Teixeira. Simulação numérica e equilíbrio limite aplicado à retroanálise de taludes em mineração de carvão. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

OURO PRETO. Plano Municipal de Redução de Riscos – PMRR. Ouro Preto, 2023. Volume 1: Resultado do Mapeamento do Risco. Equipe técnica: Eduardo Antonio Gomes Marques, Leonardo Andrade de Souza, Frederico Garcia Sobreira, Cesar Falcão Barella, Luiz Vinícius de Castro Rangel, Maria Cristina Rocha Simão.

PINHEIRO, A. L.; SOBREIRA, F. G.; LANA, M. S. Influência da expansão urbana nos movimentos em encostas na cidade de Ouro Preto, MG. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 56, n.3, p. 169-174, 2003.

SANTOS, A. L.; SILVA, F. T.; PEREIRA, M. R. Impactos da urbanização desordenada e os riscos geotécnicos em Ouro Preto. 2015.

SILVA, N.L. Correlação entre pluviosidade e movimentos gravitacionais de massa no Alto Ribeirão do Carmo/MG. 2014. 114 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

SOBREIRA, F.G. & FONSECA, M.A. (2001). Impactos físicos e sociais de antigas atividades de mineração em Ouro Preto, Brasil. Revista Portuguesa de Geotecnia nº 92, p.5-28.

SOUZA, S. A. de; COELHO, M. H.; VIEIRA, W. de L.; CARDOSO, A. P.; BEZERRA, L. C. A.; VERDE NETO, J. C. L. Estudos das chuvas máximas para o município de Iguatu-CE, 2016.

SOUZA, Hugo Alvarenga de; PEREIRA, Luana; LIMA, Arnon; RESENDE, Fernando; SILVA, João Vitor da. Compilação de parâmetros de resistência do Quadrilátero Ferrífero, 2024.

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

TATIZANA, C., OGURA, A. T., CERRI, L. E. S., ROCHA, M. C. M. (1987). Modelamento numérico da análise de correlação entre Chuvas e Escorregamentos aplicado às encostas da Serra do Mar. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 5. São Paulo. Anais. São Paulo: ABGE. v.2, pp.237-248.

TAVARES, R.B. (2006). Atividades extrativas minerais e seus corolários na bacia do alto Ribeirão do Carmo: da descoberta do ouro aos dias atuais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia. UFOP. 103p.

TEMOTEO, J.P.S. (1993). Condicionantes Geológicas – Geotécnicas na estabilidade dos taludes (Maciço da Tijuca). Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociência, UFRJ.