



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

---



**Márcio Alves Teixeira de Oliveira**

**MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA: AVALIAÇÃO DO RISCO  
GEOTÉCNICO PARA EDIFICAÇÕES PRÓXIMAS AO MORRO DA FORÇA, NO  
DISTRITO SEDE DO MUNICÍPIO DE OURO PRETO, POR MEIO DO MÉTODO DO  
ÍNDICE DE RISCO (iR)**

Ouro Preto

2022

**MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA: AVALIAÇÃO DO RISCO  
GEOTÉCNICO PARA EDIFICAÇÕES PRÓXIMAS AO MORRO DA FORÇA, NO  
DISTRITO SEDE DO MUNICÍPIO DE OURO PRETO, POR MEIO DO MÉTODO DO  
ÍNDICE DE RISCO (iR)**

**Márcio Alves Teixeira de Oliveira**

Trabalho Final de Curso apresentado  
como parte dos requisitos para obtenção  
do Grau de Engenheiro Civil na  
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 10/06/2022

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Me. Mateus Oliveira Xavier

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Ma. Vera Lúcia Silva Tavares

Ouro Preto

2022

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

O48m Oliveira, Marcio Alves Teixeira de.  
Movimentos gravitacionais de massa [manuscrito]: avaliação do risco geotécnico para edificações próximas ao morro da forca, no distrito sede do município de Ouro Preto, por meio do método do índice de risco (IR). / Marcio Alves Teixeira de Oliveira. - 2022.  
74 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Me. Mateus Oliveira Xavier.  
Coorientadora: Profa. Ma. Vera Lúcia Silva Tavares.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Levantamentos geológicos - Avaliação de riscos. 2. Índice de Risco (IR). 3. Forca, Morro da (Ouro preto, MG). 4. Deslizamentos (Geologia) - Ouro preto (MG). 5. Escorregamento (Geologia) - Ouro preto (MG). I. Tavares, Vera Lúcia Silva. II. Xavier, Mateus Oliveira. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Márcio Alves Teixeira de Oliveira**

**Movimentos Gravitacionais de Massa: Avaliação do Risco Geotécnico para Edificações Próximas ao Morro da Forca, no Distrito Sede do Município de Ouro Preto, por Meio do Método do Índice de de Risco (iR)**

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

Aprovada em 10 de junho de 2022

### Membros da banca

Mestre - Mateus Oliveira Xavier - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Mestra - Vera Lúcia Silva Tavares - Coorientadora  
Doutor - Felipe de Campos Loch - Membro (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Doutora - Daniela Antunes Lessa - Membro (Universidade Federal de Ouro Preto)

Mateus Oliveira Xavier, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 10/06/2022



Documento assinado eletronicamente por **Katia Inacio da Silva, COORDENADOR(A) DE CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**, em 24/06/2022, às 15:11, 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 **0351297** e o código CRC **9D546BE8**.

*Dedico este trabalho a todos aqueles que em algum momento estiveram comigo nessa jornada, com especial menção à Amanda, minha amada companheira e confidente, e a Rajado pela presença em minha vida.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aO Criador pelo sustento e por me permitir concluir mais essa etapa; a minha família, parte indissociável da minha caminhada até aqui, em especial a minha mãe, Dona Maria, incentivadora fervorosa e mulher de fé, ao meu pai, Seu Hélio, aos meus irmãos, Edson e Emilly, à Érica, minha cunhada e aos meus sobrinhos, Elisa e Luis Otávio.

Agradeço, também, aos professores da UFOP, em especial aos meus orientadores, o Prof. Mateus Xavier e a Prof<sup>a</sup>. Vera Lúcia, pelos esclarecimentos e pela ajuda na consecução deste trabalho.

## RESUMO

Os movimentos gravitacionais de massa são eventos geológico-geotécnicos desencadeados sobretudo em encostas e são determinados por fatores naturais, que podem ser agravados quando da interferência antrópica. O Brasil é um país que possui muitas áreas urbanas com suscetibilidade a ocorrência desse tipo de evento, que todos os anos, sobretudo durante as chuvas de verão, causam grandes transtornos sociais e econômicos a sua população. O dimensionamento do risco quanto aos movimentos gravitacionais de massa é um parâmetro importante para determinar a ocupação próxima a locais que apresentam alguma suscetibilidade. Nesse sentido, foi feito um estudo sobre o índice de risco geológico-geotécnico para o Morro da Forca, localizado no distrito sede da cidade histórica de Ouro Preto, Minas Gerais, que teve um grande movimento de massa no dia 13 de janeiro de 2022. Os cálculos foram realizados considerando as edificações próximas ao pé do morro e para três situações distintas: para antes do evento do dia 13 de janeiro de 2022, para depois do evento, considerando apenas o retaludamento do morro, e para depois do evento, considerando, dessa vez, o retaludamento mais as obras de contenção propostas pela prefeitura do município. Para isso, foi utilizada a metodologia desenvolvida por Tavares (2018), que considera parâmetros históricos, localização das edificações quanto ao maciço, utilização dessas edificações, características intrínsecas do local estudado e a existência ou não de obras de contenção. Os resultados encontrados foram comparados entre si, sendo observado uma redução quantitativa do risco e uma melhora qualitativa da segurança quando da existência de intervenções visando a segurança da encosta. Por fim, foram feitas sugestões para trabalhos futuros.

Palavras-chaves: risco geológico-geotécnico, índice de risco, prevenção, morro da forca, deslizamento ouro preto.

## **ABSTRACT**

Landslide are geological-geotechnical events triggered mainly on slopes and are determined by natural factors, which can be aggravated by human interference. Brazil is a country that has many urban areas susceptible to the occurrence of this type of event, which every year, especially during the summer rains, cause major social and economic disruption to its population. The hazard dimensioning of landslide is an important parameter to determine the occupation near susceptible areas. In this sense, a study was done on the geological-geotechnical hazard ratio for Morro da Forca, located in the district headquarters of the historical city of Ouro Preto, Minas Gerais, which had a large landslide on January 13, 2022. The calculations were performed considering the buildings near the foot of the hill and for three different situations: before the January 13, 2022 event, after the event, considering only the hill's resurfacing, and after the event, considering this time the resurfacing plus containment works proposed by the city government. For this, the methodology developed by Tavares (2018) was used, which considers historical parameters, location of the buildings in relation to the massif, use of these buildings, intrinsic characteristics of the site studied, and the existence or not of containment works. The results found were compared among themselves, being observed a quantitative reduction of hazard and a qualitative improvement of safety when the existence of interventions aimed at the safety of the slope. Finally, suggestions for future work were made.

Keywords: geological-geotechnical hazard, hazard ratio, prevention, morro da forca, landslide ouro preto.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração do movimento gravitacional de massa do tipo "escorregamento", sendo o subtipo rotacional representado em A, e o subtipo translacional, em B; imagem adaptada de <i>Landslide Types and Processes</i> . Fonte: USGS, 2004. ....	6
Figura 2 – Ilustração do movimento gravitacional de massa do tipo "escorregamento", subtipo translacional, em que há o movimento de bloco(s); imagem adaptada de <i>Landslide Types and Processes</i> . Fonte: USGS, 2004.....	7
Figura 3 – Suscetibilidade a deslizamentos no Brasil. Fonte: IBGE (2019). ....	16
Figura 4 – Localização do município de Ouro Preto – Minas Gerais, Brasil. Fonte: Versiani, 2007. ....	17
Figura 5 – Mapa da cidade com indicação aproximada da Serra de Ouro Preto, ao Norte, e da Serra do Itacolomi, ao Sul. Fonte: Google (com modificações). ....	19
Figura 6 – Casarão Solar Baeta Neves atingido por um deslizamento da parte Sul do Morro da Forca, provocado pelas chuvas de 1979. Fonte: Portal R7. ....	21
Figura 7 – Escorregamento da Rua Padre Rolim no ano de 2012. Fonte: Foto de Eduardo Tropia/Ouopress/EFE/VEJA. Adaptado de XAVIER (2018). ....	22
Figura 8 – Escorregamento de parte do Morro da Forca, em 2022. Fonte: Foto de Roberto Lourenço. Adaptado de Jornal O Liberal. ....	22
Figura 9 – Vista superior do Morro da Forca antes do movimento gravitacional de massa ocorrido em 13 de janeiro de 2022. Fonte: Google (com modificações). ....	25
Figura 10 – Fotografia da Estação Ferroviária de Ouro Preto, com vista para o casarão Solar Baeta Neves, em que é possível ver a porção Sul do Morro da Forca que desceu. Fonte: Foto de autor desconhecido. ....	25
Figura 11 – Escorregamento translacional ocorrido no Morro da Forca, em 2022. Fonte: Foto de Wandrey Cristiano.....	26

Figura 12 – Obra de retaludamento no Morro da Forca após a ruptura. Fonte: Foto de Filipe Lage, via Portal Prefeitura de Ouro Preto. ....	27
Figura 13 – Localização das edificações em estudo. Fonte: Google Earth (com modificações). ....	28
Figura 14 – Hotel Nossa Senhora Aparecida e Restaurante e Lanchonete Terra de Minas (à esquerda); Bar e Restaurante Manjuba (ao centro); Drograria São Camilo (à direita). Fonte: Google Earth (com modificações). ....	29
Figura 15 – Detalhe do Morro da Forca ao fundo das edificações. Fonte: Google Earth (com modificações). ....	29
Figura 16 – Fluxograma com a organização do presente trabalho. Fonte: o autor. ....	30
Figura 17 – Esquema para entendimento da inferência do alcance dos movimentos gravitacionais de massa. Adaptado de TAVARES (2018). ....	37
Figura 18 – A: área vulnerável a sofrer danos por um novo MGM; B e C: detalhes de edificações próximas ao pé do Morro da Forca. Fonte: Google Earth (com modificações). ....	43
Figura 19 – Gráfico da evolução do índice de risco (iR). Fonte: o autor. ....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo da classificação proposta por Hungr et. al. (2014). Adaptado por (XAVIER, 2018).....	5
Tabela 2 – Resumo dos principais conceitos de risco. Adaptado de CORTELETTI (2017).....	8
Tabela 3 – Diferentes proposições do conceito de hazard. Adaptado de CORTELETTI (2017).....	10
Tabela 4 – Resumo dos principais conceitos atrelados aos termos suscetibilidade e vulnerabilidade. Adaptado de CORTELETTI (2017). ....	12
Tabela 5 – Registros de movimentos de massa na área urbana de Ouro Preto: 1988 a 2009. (Defesa Civil de Ouro Preto, 2010). Adaptado de FONTES (2011).....	23
Tabela 6 – Resumo de Eventos relativos a MGM com o número de eventos por bairro, a frequência e a probabilidade relativas anuais no período de 1979 a 2017. Adaptado de TAVARES (2018). ....	31
Tabela 7 – Descrição de áreas e estimativa da parcela correspondente a vulnerabilidade Espacial. Oliveira (2004). Adaptado de TAVARES (2018).....	34
Tabela 8 – Estimativas da parcela de vulnerabilidade correspondente à probabilidade temporal para uma família padrão. Oliveira (2004). Adaptado de TAVARES (2018). ....	35
Tabela 9 – Estimativas da parcela de vulnerabilidade de um indivíduo em sua residência. Oliveira (2004). Adaptado de TAVARES (2018). ....	36
Tabela 10 – Fatores de correção em função das obras de intervenção realizadas (Cortelletti, 2017). Adaptado de TAVARES (2018).....	38
Tabela 11 – Escala de classificação do índice de risco. ....	39
Tabela 12 – Cálculo do Índice de Risco (iR) para o Morro da Forca. Adaptado de TAVARES (2018). ....	40

Tabela 13 – Resumo de eventos de MGM calculado a partir da soma dos dados levantados por Tavares (2018) somados à frequência relativa anual para o período de 2017 a 2022. ....	41
Tabela 14 – Probabilidade relativa para a pré-ruptura.....	42
Tabela 15 – Parâmetros para o cálculo da Vulnerabilidade Espacial ( $V_s$ ).....	43
Tabela 16 – Vulnerabilidade Temporal ( $V_t$ ). ....	44
Tabela 17 – Vulnerabilidade Individual ( $V_I$ ). ....	44
Tabela 18 – Vulnerabilidades para o momento pré-ruptura, calculada a partir da Equação 3. ....	44
Tabela 19 – Fator de Correção ( $F_i$ ) para a pré-ruptura.....	45
Tabela 20 – Cálculo do Índice de Risco ( $iR$ ) para a pré-ruptura, calculada a partir da Equação 4. ....	45
Tabela 21 – Probabilidade relativa para a pós-ruptura, calculada a partir da Equação 2, considerando apenas o retaludamento. ....	47
Tabela 22 – Vulnerabilidades para o momento pós-ruptura, calculada a partir da Equação 3, considerando apenas o retaludamento. ....	48
Tabela 23 – Fator de Correção ( $F_i$ ) para a pós-ruptura, considerando apenas o retaludamento. ....	48
Tabela 24 – Cálculo do Índice de Risco ( $iR$ ) pós-ruptura, calculado a partir da Equação 4, considerando apenas o retaludamento. ....	49
Tabela 25 – Probabilidade relativa para a pós-ruptura, calculada a partir da Equação 2, considerando o retaludamento e as obras de contenção.....	50
Tabela 26 – Vulnerabilidades para o momento pós-ruptura, calculada a partir da Equação 3, considerando o retaludamento e as obras de contenção.....	51
Tabela 27 – Fator de Correção ( $F_i$ ) para a pós-ruptura, considerando o retaludamento e as obras de contenção. ....	51

Tabela 28 – Cálculo do Índice de Risco (iR) pós-ruptura, calculado a partir da Equação 4, considerando o retaludamento e as obras de contenção.....52

Tabela 29 – Resumo dos resultados encontrados para o índice de risco.....53

## SUMÁRIO

1	Introdução .....	1
1.1	Objetivo .....	3
1.1.1	Objetivos Específicos.....	3
2	Revisão Bibliográfica.....	4
2.1	Tipos de movimentos gravitacionais de massa .....	4
2.1.1	Escorregamentos (Slides).....	5
2.2	Análise de risco aos movimentos gravitacionais de massa .....	7
2.2.1	Risco .....	7
2.2.2	Perigo ( <i>Hazard</i> ).....	9
2.2.3	Suscetibilidade e Vulnerabilidade .....	11
2.3	Leis relacionadas à prevenção e mitigação dos movimentos gravitacionais de massa e histórico de movimentos gravitacionais de massa no Brasil	14
3	Área de estudo.....	17
3.1.1	Apresentação da área de estudo .....	17
3.1.2	Histórico de movimentos gravitacionais de massa na área de estudo	19
3.1.3	Caracterização dos movimentos gravitacionais de massa mais recorrentes na área de estudo.....	24
3.1.4	Caracterização do evento no Morro da Forca, no Distrito Sede de Ouro Preto	24
3.1.5	Identificação dos processos que desencadearam o evento.....	26
3.1.6	Obra de retaludamento no Morro da Forca após a ruptura .....	27

3.1.7	Edificações objeto de estudo .....	28
4	Metodologia.....	30
4.1	Metodologia proposta para o cálculo do índice de Risco (iR).....	31
4.1.1	Cálculo das probabilidades .....	31
4.1.2	Vulnerabilidades.....	33
4.1.3	Fator de correção (Fi) .....	37
4.1.4	Cálculo do Índice de Risco (iR) proposto .....	38
4.1.5	Aceitabilidade e escala de classificação do risco geológico .....	39
5	Resultados .....	40
5.1	Exemplo de estudo desenvolvido por Tavares (2018) para o casarão Solar Baeta Neves e as outras edificações atingidas no evento do dia 13 de janeiro de 2022	40
5.2	Avaliação do Risco Pré-Ruptura para edificações não atingidas no evento do dia 13 de janeiro de 2022.....	41
5.3	Avaliação do Risco Pós-Ruptura para edificações não atingidas no evento dia 13 de janeiro de 2022.....	46
5.3.1	Estabilização da Encosta: Análise Sobre as Obras no Morro da Forca	46
5.3.2	Índice de Risco Pós-Ruptura – Retaludamento .....	47
5.3.3	Índice de Risco Pós-Ruptura – Retaludamento e Obras de Contenção	50
5.4	Discussão dos resultados.....	53
6	Conclusão .....	54
6.1	Sugestões para trabalhos futuros .....	55

Referências.....56

# 1 INTRODUÇÃO

Os movimentos gravitacionais de massa (MGM), equivocadamente chamados de deslizamento de terra ou escorregamentos, são processos geodinâmicos que ocorrem em áreas que apresentam suscetibilidade a ocorrência desse tipo de evento. Trata-se de evento natural que pode ser potencializado por ação antrópica, como o corte de encostas e o desmatamento, por exemplo. Segundo Highland e Bobrowsky (2008), “deslizamento” é um termo geral usado para descrever o movimento descendente de solo, rocha e materiais orgânicos sob os efeitos da gravidade e também do relevo que resulta de tal movimento.

A ocorrência do movimento de massa é deflagrada quando a força de cisalhamento, gerada pela ação da gravidade, supera a força de resistência, gerada pelo atrito entre as partículas, acarretando o movimento de uma porção de massa sobre uma superfície. Segundo Zêzere (2005), os fatores de predisposição são estáticos e inerentes ao terreno, tendo como condicionantes o grau de instabilidade potencial da encosta e determinam a variação espacial do grau de suscetibilidade do terreno à instabilidade.

No Brasil, os MGM são eventos que estão associados a desastres socioeconômicos, considerando a sua ocorrência em regiões habitadas, com a consequente perda de vidas humanas e de bens materiais, o que gera apreensão pela sociedade, principalmente nas épocas de chuvas. Isso se deve à urbanização desregulada e à inoperância das autoridades responsáveis (que frequentemente associam a ocorrência desses eventos unicamente a fatores naturais) em impedir a ocupação de áreas sujeitas a movimento de massa, e, consoante a isso, à falta de amparo técnico competente pela população no momento de ocupar tais localidades. Devido às características de seu meio físico, a seu clima tropical e à alta pluviosidade, o país apresenta um conjunto de fatores que favorecem, em algumas regiões, o desencadeamento de fenômenos de deslizamentos (IBGE, 2019).

No estudo intitulado “Suscetibilidade a deslizamentos do Brasil: primeira aproximação”, o IBGE (2019) faz um macro panorama sobre a situação do país acerca

das suas zonas de risco quanto aos movimentos gravitacionais de massa. Esse estudo demonstrou que 5,7% do território nacional apresenta alta suscetibilidade aos MGM. Desse percentual, a região Sudeste perfaz um total de 25% (IBGE, 2019).

Com a finalidade de mitigar a ocorrência desse tipo de desastre, universidades, institutos de pesquisa e o próprio governo brasileiro têm tomado medidas a fim de mapear os locais que apresentam suscetibilidade à ocorrência de MGM que possam causar algum tipo de dano à população. A exemplo disso, foram criadas leis que obrigam os municípios a mapearem os locais com probabilidade de ocorrência desse tipo de evento. A última medida nesse sentido foi o Decreto Nº 10.692/2021 que instituiu o cadastro nacional de municípios com áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos (BRASIL, 2021).

O município de Ouro Preto, em Minas Gerais, apresenta vários dos elementos necessários para a ocorrência dos MGM. A sua geomorfologia, clima e a ocupação irregular de áreas de risco favorecem à ocorrência de desastres. A cidade já passou por alguns eventos marcantes, como o movimento translacional de massa na Serra de Ouro Preto, em 2012, no qual uma porção de massa deslizou e atingiu parte do terminal rodoviário do distrito sede do município, e, mais recentemente, o MGM do tipo translacional no Morro da Forca, em janeiro de 2022.

Considerando esse cenário local propício a ocorrência de movimentos gravitacionais de massa e o histórico de eventos que a cidade possui, será calculado o Índice de Risco (iR), para o Morro da Forca, para o momento pré-evento do dia 13 de janeiro e o iR para o momento após esse evento. Para esse último caso, será considerado o momento em que houve apenas o retaludamento e um outro momento em que obras de contenção, propostas pela Prefeitura Municipal de Ouro Preto, foram construídas no Morro da Forca.

## **1.1 Objetivo**

Calcular o Índice de Risco (iR) com base na metodologia desenvolvida por Tavares (2018), aplicada ao Distrito Sede do Município de Ouro Preto, para edificações próximas ao Morro da Forca.

### **1.1.1 Objetivos Específicos**

Analisar a evolução do Índice de Risco (iR) para o Morro da Forca, nos momentos de pré-ruptura, pós-ruptura (retaludamento) e pós-ruptura (retaludamento mais obras de contenção).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Tipos de movimentos gravitacionais de massa

Um movimento gravitacional de massa é um movimento descendente de rocha, solo, ou ambos, ocorrendo numa superfície de ruptura curva (movimento do tipo rotacional) ou plana (movimento do tipo translacional), na qual boa parte do material se move como uma massa coerente ou semicoerente com pouca deformação interna (HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008).

Existem várias classificações para os MGM, o que traduz a complexidade desses eventos e a dificuldade em se instituir uma definição universal sobre eles. As classificações mais conhecidas e utilizadas na literatura são dadas por Varnes (1954, 1978) e Cruden e Varnes (1996), sendo essa última uma revisão da primeira. Há, ainda, uma atualização proposta por Hungr *et. al.* (2014) na qual é feita uma complementação à classificação proposta por Varnes (1954, 1978). O sistema de classificação de escorregamentos desenvolvido por D.J. Varnes tornou-se o sistema mais utilizado na língua inglesa, sendo sua popularidade sustentada na América do Norte e suas variações em todos os outros continentes atestam sua utilidade (HUNGR, LEROUEIL e PICARELLI, 2014). A classificação de Varnes (1954, 1978) foi a adotada no presente trabalho, devido ao fato de ser a classificação mais utilizada em trabalhos internacionais.

A classificação dos MGM proposta por Hungr *et. al.* (2014) define o tipo de movimento juntamente com o tipo de material envolvido. A Tabela 1, apresenta um resumo dessa classificação. Em seguida, é apresentada a definição do tipo de movimento proposta por Varnes (1954, 1978) e atualizada por Hungr *et. al.* (2014) que será objeto principal no desenvolvimento deste trabalho.

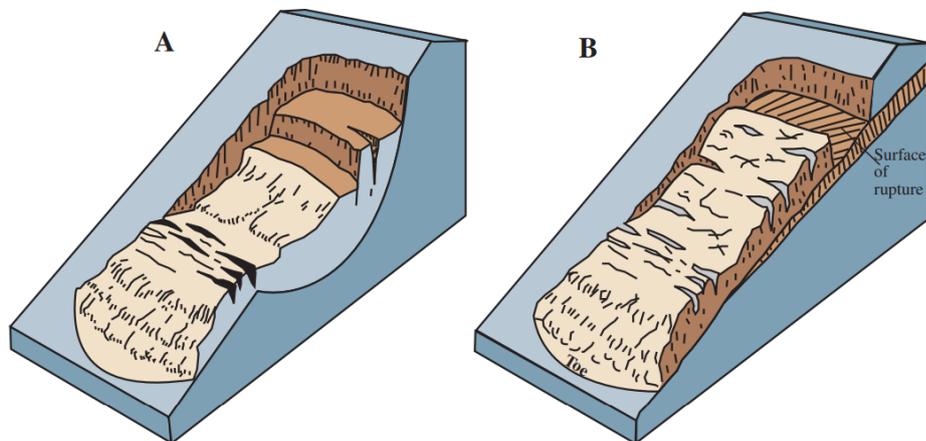
**Tabela 1 – Resumo da classificação proposta por Hungr et. al. (2014).  
Adaptado por (XAVIER, 2018).**

Tipos de movimentos	Tipos de materiais envolvidos	
	Rocha	Solo
Quedas	1. Queda de rocha/gelo	2. Queda de pedregulho/detritos/silte
Tombamentos	3. Tombamento de bloco rochoso	5. Tombamento de cascalho/areia/silte
	4. Tombamento em dobramento rochoso	
Escorregamentos	6. Escorregamento rotacional de rocha	11. Escorregamento rotacional de silte/argila
	7. Escorregamento translacional de rocha	12. Escorregamento translacional de silte/argila
	8. Escorregamento em cunha de rocha	13. Escorregamento translacional de cascalho/areia/detritos
	9. Escorregamento composto em rocha	14. Escorregamento composto de silte/argila
10. Escorregamento irregular de rocha		
Espalhamentos laterais	15. Espalhamento em rocha	16. Espalhamento por liquefação de areia/silte
		17. Espalhamento de argila sensível
Fluxos	18. Avalanche de rocha/gelo	19. Fluxo em ambiente seco de areia/silte/detritos
		20. Fluxo de areia/silte/detritos
		21. Fluxo de argila sensível
		22. Corrida de detritos
		23. Corrida de lama
		24. Inundação com detritos
		25. Avalanche com detritos
		26. Fluxo de terra
27. Fluxo de turfa (solo orgânico)		
Deformação de encosta	28. Deformação de encosta montanhosa	30. Deformação de encostas em solo
	29. Deformação de encostas rochosas	31. Rastejo do solo
		32. Solifluxão

### 2.1.1 Escorregamentos (Slides)

Embora muitos tipos de movimentos de massa sejam incluídos no termo geral “escorregamento de terra”, o uso mais restritivo do termo se refere apenas a movimentos de massa em que há uma zona distinta de fraqueza que separa o material

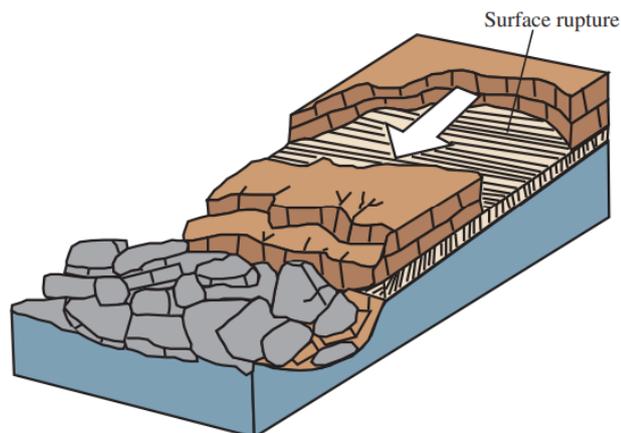
da parte mais estável de material subjacente (USGS, 2004). Os escorregamentos são subcategorizados em rotativos e translacionais (também chamados de planares). A Figura 1 apresenta uma ilustração desse tipo de movimento.



**Figura 1 – Ilustração do movimento gravitacional de massa do tipo "escorregamento", sendo o subtipo rotacional representado em A, e o subtipo translacional, em B; imagem adaptada de Landslide Types and Processes.**

**Fonte: USGS, 2004.**

Ainda, em se tratando de escorregamento translacional, esse pode ocorrer com movimento de bloco, em que a massa móvel consiste em uma única unidade ou algumas unidades intimamente relacionadas de blocos que se movem ladeira abaixo como uma massa relativamente coerente (USGS, 2004). A Figura 2 apresenta uma ilustração desse tipo de movimento.



**Figura 2 – Ilustração do movimento gravitacional de massa do tipo "escorregamento", subtipo translacional, em que há o movimento de bloco(s); imagem adaptada de *Landslide Types and Processes*. Fonte: USGS, 2004.**

## **2.2 Análise de risco aos movimentos gravitacionais de massa**

A análise de risco a ocorrência de eventos envolvendo os MGM se faz necessária para se conhecer as áreas suscetíveis a ocorrência desse tipo de evento e seus possíveis desdobramentos no que diz respeito aos aspectos sociais e econômicos. A suscetibilidade de uma área a um determinado fenômeno geológico corresponde à possibilidade de sua ocorrência como um evento sem danos, enquanto risco está relacionado à possibilidade de que a ocorrência do fenômeno tenha consequências sociais e econômicas (CERRI e AMARAL, 1998, *apud* TOMINAGA *et al.*, 2009).

A seguir, é apresentado alguns dos conceitos relacionados à análise de riscos aos MGM.

### **2.2.1 Risco**

O termo risco apresenta várias definições, não sendo consenso entre os principais autores que discutem o tema. Só para se ter ideia, a *United States Society for Risk Analysis*, em estudo divulgado em 1981, apresentou 14 definições diferentes sobre risco (FELL, 1994 *apud* CORTELETTI, 2017). Ressaltou-se que as definições não

poderiam alcançar uma ampla concordância e recomendou-se que não fosse estabelecida uma definição única e simples de risco, mas que o termo fosse adequado de forma mais apropriada para cada caso (CORTELETTI, 2017).

A Tabela 2 a seguir apresenta um resumo dos principais conceitos de risco.

**Tabela 2 – Resumo dos principais conceitos de risco. Adaptado de CORTELETTI (2017).**

Ano	Autor	Definição de Risco
1984	Varnes <i>et al.</i>	O número esperado de vidas perdidas, pessoas feridas, danos à propriedade e interrupção de atividade econômica, devido a um fenômeno particular para uma dada área e período de referência.
1990	Augusto Filho, Cerri e Amenomori	Representa a possibilidade ou probabilidade de ocorrência de algum dano a uma população (pessoas, estruturas físicas, sistemas produtivos) ou a um segmento dela. É uma condição potencial de ocorrência de um acidente.
1993	Zuquette	É a probabilidade de que ocorram perdas (econômicas, sociais e ambientais), além de um valor ser considerado normal ou aceitável para um lugar específico, durante um período de tempo determinado. É considerado o resultado da relação entre um hazard e vulnerabilidade dos elementos expostos (seres humanos, residências, entre outros).
1993	Cerri	Situação de perigo, perda ou dano, ao homem e às suas propriedades, em razão da possibilidade de ocorrência de processos geológicos, induzidos ou não.
1995	ABGE	Processo, situação ou evento no meio geológico de origem natural, induzidos ou mistos, que pode gerar um dano econômico ou social para as comunidades, cuja previsão, prevenção ou correção irão empregar critérios geológicos.
1997	IUGS-WGL International Union of Geological Sciences (Working Group on Landslide)	Uma medida da probabilidade e gravidade de um efeito adverso para a propriedade, à saúde ou meio ambiente. Segue em notas que “Risco é estimado pelo produto de consequências X probabilidades”. No entanto, uma interpretação mais geral de risco implica uma comparação da probabilidade e consequências de uma forma de não produto.
1998	Carvalho	Consequência, ou dano esperado de eventos aleatórios associados a processos de instabilização de maciços naturais, artificiais ou obras geotécnicas.
2004	JTC32 - Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes 32	Medida da probabilidade e gravidade de um efeito adverso à saúde, vida, propriedade ou ao ambiente. Quantitativamente, Risco = Hazard x Potencial Worth of Loss. Isso pode ser também expressado como “Probabilidade de um evento adverso x consequências se o evento ocorre”.
2005	Amaro	Função da natureza do perigo, acessibilidade ou via de contato (potencial de exposição), características da população exposta (receptores).

**Tabela 2 (Continuação) – Resumo dos principais conceitos de risco. Adaptado de CORTELETTI (2017).**

Ano	Autor	Definição de Risco
2005	Einstein	Função da probabilidade de ocorrência da ameaça e das consequências, o qual pode envolver perdas de vidas ou ferimentos a pessoas, perdas de capital ou danos ambientais não monetários.
2007	Dagnino e Crapi Jr.	Presente em situações ou áreas em que existe a probabilidade, a suscetibilidade, a vulnerabilidade, o acaso ou o azar de ocorrer algum tipo de ameaça, perigo, problema, impacto ou desastre.
2007	AGS - Australian Geomechanics Society	Uma medida da probabilidade e gravidade de um efeito adverso à saúde e ao ambiente. O risco é frequentemente estimado pelo produto da probabilidade e consequências. No entanto, uma forma mais geral de interpretação do risco implica uma comparação da probabilidade e as consequências de uma forma não-produto.
2008	USGS - United States Geological Survey	Risco de escorregamento: a probabilidade de consequências prejudiciais (o número esperado de vias perdidas, pessoas feridas, extensão de danos à propriedade ou a sistemas ecológico, ou interrupção das atividades econômicas) dentro de uma área sujeita a escorregamentos. O risco pode ser de abrangência individual ou coletiva, resultante da interação entre a ameaça e a vulnerabilidade individual ou coletiva
2009	ABNT NBR ISO 31.000 - Norma Brasileira aprovada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas.	Efeito (desvio em relação ao esperado – positivo e/ou negativo) da incerteza nos objetivos (Os objetivos podem ter diferentes aspectos (tais como metas financeiras, de saúde, de segurança e ambientais) e podem aplicar-se em diferentes níveis (tais como estratégico, em toda a organização, de projeto, de produto e de processo)

### 2.2.2 Perigo (*Hazard*)

O termo *perigo* não possui uma definição apaziguada entre os pesquisadores da área de MGM. Em se tratando de análise de risco, o termo *hazard*, neste trabalho traduzido como perigo, é um dos que apresenta maiores conflitos entre os autores nacionais, uma vez que sua tradução literal para o português brasileiro pode ser entendida como “ameaça”, “perigo”, “suscetibilidade” ou até mesmo como “risco” (XAVIER, 2018). No Brasil, em diversos estudos científicos nas áreas geológicas e geotécnicas, o termo não possui entendimento comum entre os pesquisadores, podendo ser entendido como perigo, ameaça, suscetibilidade, ou mesmo como risco (CORTELETTI, 2017).

A Tabela 3, confeccionada a partir de conceitos de diferentes autores, sintetiza as várias definições relacionados ao termo *hazard*. A definição utilizada pelo presente trabalho será a da USGS (*United States Geological Survey*), por ser a mais recente.

**Tabela 3 – Diferentes proposições do conceito de hazard. Adaptado de CORTELETTI (2017).**

Ano	Autor	<i>Hazard</i>
1984	Varnes	A probabilidade de ocorrência de um processo potencialmente danoso numa determinada área e num certo período de tempo.
1993	Zuquette	Evento perigoso: representa um perigo (latente) que se associa a um fenômeno de origem natural ou provocado pelo homem, que se manifesta em um lugar específico, em tempos determinados, produzindo efeitos adversos nas pessoas, nos bens, e/ou no meio ambiente.
1994	Fell	Refere-se ao potencial de ocorrência de um escorregamento de terra que cause danos em uma área; tal dano poderia incluir perdas de vida ou lesões, danos a propriedades, perturbação social e econômica ou degradação do meio ambiente.
1997	Einstein	Trabalha com a incerteza de um perigo, com a sua previsibilidade limitada. É a probabilidade de que um perigo particular ocorra em um determinado período de tempo.
1997	IUGS-LWG <i>International Union of Geological Sciences - (Landslide Working Group)</i>	Uma condição com potencial para causar consequências indesejáveis. Ameaças de escorregamento devem ser descritas por zonas e magnitudes.
1998	ABGE	Caracterizou como melhor termo para <i>hazard</i> , nas áreas geotécnicas, a palavra suscetibilidade.
1998	Rodrigues-Carvalho	Perigo natural: a probabilidade de ocorrência, num determinado período de tempo e numa dada área, de um fenômeno potencialmente danoso (extraída de <i>United Nations Disaster Relief Office - UNDRO, 1992</i> ).
2004	JTC32	O potencial de que uma ameaça particular ocorra dentro de um determinado período de tempo.
2007	ASG	Uma condição com o potencial de causar uma consequência indesejável. Na descrição de deslizamento de terra, o <i>hazard</i> deve incluir o local, o volume (ou área), a classificação e a velocidade dos deslizamentos e a probabilidade da sua ocorrência ao longo de um determinado período de tempo.
2008	USGS - <i>United States Geological Survey</i>	<i>Hazard</i> para escorregamento de terra: refere-se ao potencial de ocorrência de um escorregamento de terra que cause danos dentro de uma área. Tais como: perdas de vidas ou lesões, danos à propriedade, perturbação social e econômica, ou degradação do meio ambiente.

### **2.2.3 Suscetibilidade e Vulnerabilidade**

A suscetibilidade refere-se essencialmente em termos da probabilidade espacial de ocorrência de um determinado fenômeno numa dada área, tendo em conta os fatores condicionantes inerentes ao terreno, independentemente do seu período de recorrência, ou seja, a suscetibilidade reflete uma probabilidade espacial, mas não temporal (CORTELETTI, 2017). Já a vulnerabilidade, segundo a mesma autora, possui um conceito bastante mais abstrato. Segundo Lavell (2001), para uma ameaça ou um perigo existir, é necessária a existência da vulnerabilidade (LAVELL, 2001).

Os avanços nas discussões para desenvolver tipos de metodologias capazes de traduzir o abstrato conceito de vulnerabilidade em ferramentas práticas para aplicação indicam a tendência de operacionalizar o conceito, principalmente no sentido de sua mensuração (quantitativa ou semiquantitativa) e hierarquização espacial (CORTELETTI, 2017).

A Tabela 4 traz um resumo dos principais conceitos atrelados aos termos suscetibilidade e vulnerabilidade.

**Tabela 4 – Resumo dos principais conceitos atrelados aos termos suscetibilidade e vulnerabilidade. Adaptado de CORTELETTI (2017).**

Ano	Autor	Vulnerabilidade	Suscetibilidade
1984	Varnes	Grau de perda de potencial (dano) de um dado elemento ou conjunto de elemento, sem risco resultante da ocorrência de fenômeno de catástrofe (desastres naturais) de uma determinada magnitude. Ela é expressa numa escala de 0 (ausência de danos) até 1 (perda total).	
1993	Zuquette	Característica intrínseca de um sujeito, sistema ou elemento que estão expostos a um evento perigoso (hazard), correspondendo à predisposição destes em serem afetados ou suscetíveis a perdas. É expressa em uma escala que varia de 0 (sem perdas) a 1 (perdas totais).	Possibilidade de que um escorregamento ocorra em uma área, com base nas condições do terreno local. A suscetibilidade não considera, de forma explícita, a probabilidade de ocorrência que também dependa da recorrência de fatores de disparo, tais como as precipitações ou sismos.
1994	Fell	É o grau de perda para um dado elemento ou conjunto de elementos dentro de uma área afetada pelo(s) escorregamento(s). É expressa na escala de 0 (sem danos) a 1 (perda total). No caso de perda de vida sem escorregamento, a vulnerabilidade é a probabilidade de que uma vida em particular seja perdida, dada à ocorrência do escorregamento. Sugere-se a vulnerabilidade total (V), determinada como o produto de vários componentes na forma $V = VS \times VT \times VL$ , onde VS é a probabilidade de impacto espacial, VT é a probabilidade de impacto temporal e VL, a probabilidade de perda de vida de um ocupante individual da área impactada.	Ao escorregamento, referindo-se à possibilidade de que o escorregamento ocorra em uma área com base nas condições do terreno local. A suscetibilidade não considera, de forma explícita, a probabilidade de ocorrência, que também depende de recorrência de fatores de disparo, tais como as precipitações ou sismos.
1996	Soeters e Van Westen		Propensão de uma determinada área de ser afetada por um (certo tipo) de deslizamento de terra, baseado, unicamente, em condições do terreno, não apresentando a probabilidade de ocorrência dos fenômenos.
1997	IUGS-WGL	Grau de perda de potencial para um dado elemento ou grupo de elementos dentro da área afetada por um escorregamento.	

**Tabela 4 (Continuação) – Resumo dos principais conceitos atrelados aos termos suscetibilidade e vulnerabilidade. Adaptado de CORTELETTI (2017).**

Ano	Autor	Vulnerabilidade	Suscetibilidade
2001	Nogueira	Suscetibilidade dos elementos expostos a esta ameaça (pessoas, estruturas físicas, sistemas produtivos e componentes do ambiente) de sofrer danos e prejuízos caso ocorra o evento conforme prognosticado, por estar na área de influência do evento, por sua fragilidade física frente a ele e pela incapacidade de resposta e deficiência para absorver o impacto. Esta suscetibilidade está condicionada às características intrínsecas, conjunturais ou ambientais dos elementos expostos.	
2004	JTC32	O grau de perda para um determinado elemento ou conjunto de elementos dentro da área afetada por um acidente (ameaça). Ela é expressa numa escala de 0 (sem perda) a 1 (perda total). Além disso, trata-se de um conjunto de condições resultantes de processos físicos, social, econômico e fatores ambientais, que aumentam a suscetibilidade de uma comunidade ao impacto das ameaças.	Ao escorregamento, envolve classificação de área, ou volume (magnitude) e distribuição espacial e potencial de deslizamento de terra na área de estudo. Pode também incluir uma descrição da distância de deslocamento, velocidade e intensidade do atual ou potencial escorregamento.
2005	Zêzere		Como a probabilidade espacial de ocorrência de um determinado fenômeno numa dada área, tendo em conta os fatores condicionantes existentes no terreno, independentemente do seu período de recorrência, ou seja, a suscetibilidade reflete uma probabilidade espacial, mas não temporal.
2007	ASG concordando com ISSMGE JTC 32 (2004)	Grau de perda para um determinado elemento ou conjunto de elementos dentro da área afetada pelo escorregamento. Ela é expressa numa escala de 0 (sem perda) a 1 (perda total). Para uma propriedade, a perda será o valor do dano em relação ao valor da propriedade; para pessoas, será a probabilidade que uma determinada vida (elemento em risco) será perdida, quando afetadas pelo deslizamento.	A avaliação quantitativa ou qualitativa da classificação, volume (ou área) e distribuição espacial dos deslizamentos de terra que existem, ou potencialmente pode ocorrer em uma área. A suscetibilidade pode também incluir uma descrição da velocidade e da intensidade do escorregamento existente ou potencial.
2008	USGS	Ao escorregamento de terra, refletindo a extensão das perdas potenciais para um dado elemento, ou conjunto de elementos, dentro de uma área afetada pela ameaça, expressa na escala de 0 (sem perdas) a 1 (perda total); vulnerabilidade é formada por condições físicas, sociais econômicas e ambientais.	Ao escorregamento, possibilidade de que um escorregamento ocorra em uma área com base nas condições do terreno local. A suscetibilidade não considera de forma explícita a probabilidade de ocorrência, que também depende da recorrência de fatores de disparo, tais como precipitações ou sismos.

### **2.3 Leis relacionadas à prevenção e mitigação dos movimentos gravitacionais de massa e histórico de movimentos gravitacionais de massa no Brasil**

Os eventos de deslizamentos têm provocado, quase todos os anos, diversos problemas à sociedade, tais como destruição de edificações e equipamentos urbanos, prejuízos em atividades produtivas, impactos ambientais e perdas de vidas humanas (IBGE, 2019). Para mitigar e prevenir esse tipo de acidentes, há um arcabouço de leis e medidas governamentais para prevenir os acidentes atrelados aos MGM.

A primeira lei nesse sentido data de antes da Constituição Federal de 1988. A Lei Nº 6.766/1979 dispõe sobre o parcelamento do solo urbano e dá outras providências (BRASIL, 1979). A principal contribuição dessa lei se refere à “proibição do parcelamento em terrenos com declividade superior a 30% (aproximadamente 17° de inclinação), exceto se atendidas exigências específicas das autoridades competentes” (artigo 3º, parágrafo único) (FERNANDES, 2018). A Constituição Federal instituiu, em seus artigos 182 e 183, políticas de desenvolvimento urbano, que foram regulamentadas em 2001, por meio da Lei nº 10.257 (FERNANDES, 2018).

Em 2012, foi criada a Lei Nº 12.608, que instituiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; altera as Leis nºs 12.340, de 1º de dezembro de 2010, 10.257, de 10 de julho de 2001, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.239, de 4 de outubro de 1991, e 9.394, de 20 de dezembro de 1996; e dá outras providências (BRASIL, 2012). A última medida nesse sentido foi o Decreto Nº 10.692/2021 que instituiu o cadastro nacional de municípios com áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos (BRASIL, 2021).

O Brasil, devido ao seu rápido crescimento urbano ocorrido no século XX e à falta de planejamento adequado para ocupação do solo, sofre com desastres anuais envolvendo MGM, o que sempre causa danos sociais e econômicos a sua população. Devido às características de seu meio físico, a seu clima tropical e à alta pluviosidade, o Brasil apresenta um conjunto de fatores que favorecem, em algumas regiões, o

desencadeamento de fenômenos de deslizamentos (IBGE, 2019). Nos grandes centros urbanos, os deslizamentos assumem frequentemente proporções catastróficas, uma vez que os inúmeros cortes, aterros, depósitos de lixo, desmatamentos, modificações na drenagem, entre outras agressões, geram novas relações com os fatores condicionantes naturais associados à geomorfologia e à geologia (FERNANDES, GUIMARÃES, *et al.*, 2001).

Episódios recentes ocorridos nos Estados de Santa Catarina, em 2008, e Rio de Janeiro – Ilha Grande (Angra dos Reis), em 2009; Niterói, em 2010; e na região serrana, em 2011 – ilustram os danos gerados por deslizamentos no Brasil (IBGE, 2019).

O IBGE publicou um estudo com o objetivo de mapear as áreas de riscos sujeitas a deslizamentos no País. A Figura 3 a seguir traz um mapa da suscetibilidade a deslizamentos do Brasil.

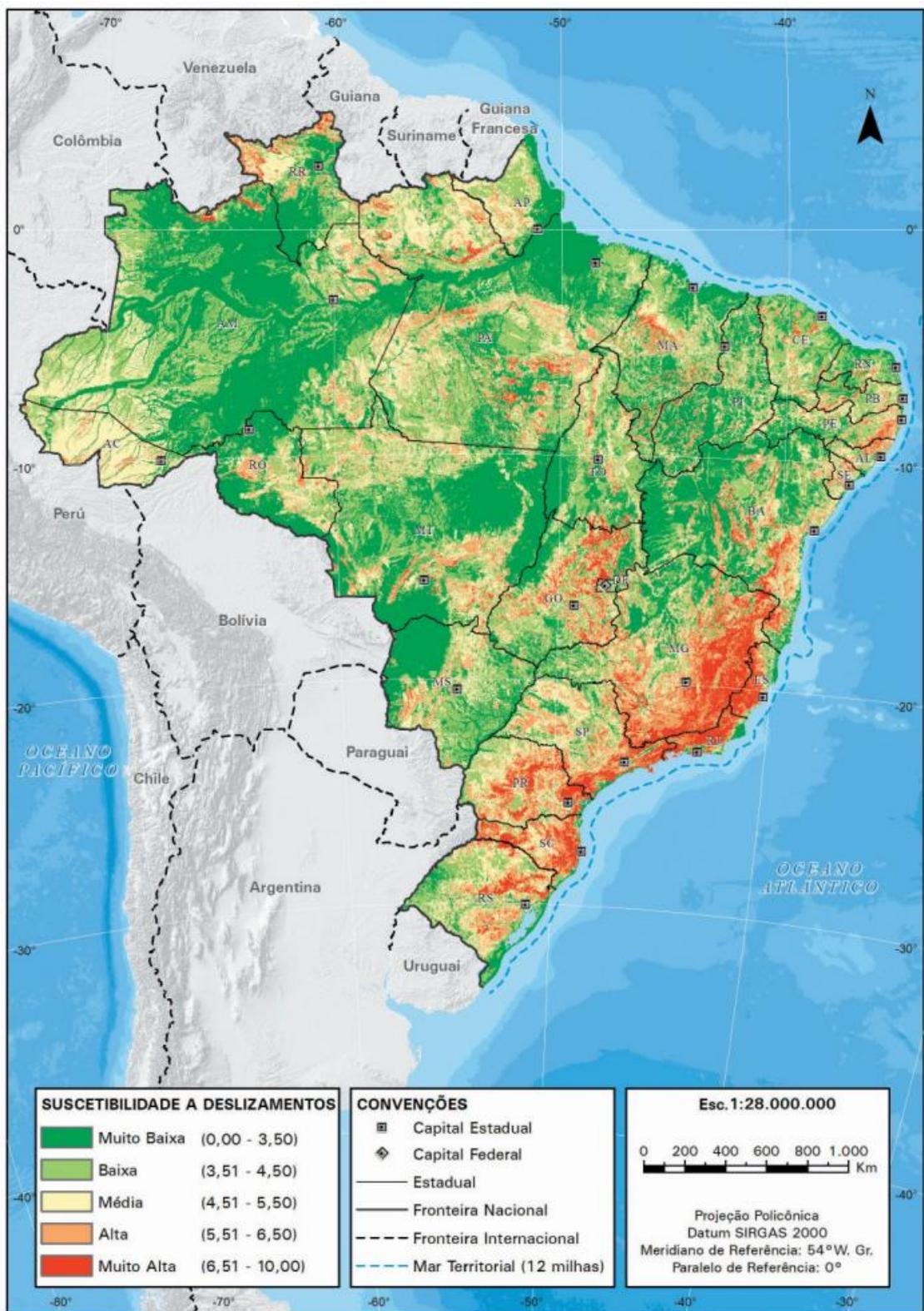


Figura 3 – Suscetibilidade a deslizamentos no Brasil. Fonte: IBGE (2019).

### 3 ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1.1 Apresentação da área de estudo

Ouro Preto é uma cidade localizada no interior do estado de Minas Gerais, distante, aproximadamente, 90 km da capital Belo Horizonte (Figura 4). A cidade está implantada em um grande vale limitado pelas serras de Ouro Preto, a Norte, e Itacolomi, a Sul, por onde corre o Ribeirão do Funil, tendo sua morfologia caracterizada por altas montanhas de desenvolvimento linear, áreas aplainadas com altitudes diversas e vales alongados, muitas vezes bem encaixados (SOBREIRA e FONSECA, 2001).



**Figura 4 – Localização do município de Ouro Preto – Minas Gerais, Brasil.**

**Fonte: Versiani, 2007.**

Estimativas do censo IBGE (2010) apontam que a cidade possui cerca de 70 mil habitantes, dos quais, aproximadamente, 50% vivem na sede do município, região em que fica localizada a área de estudo do presente trabalho. Entre as décadas de 50 a 90 do século passado, ocorreu um grande crescimento populacional, vinculado basicamente pelo potencial mineralógico da região, o que resultou na implantação de indústrias voltadas para este setor, reaquecendo a economia local (FONTES, 2011).

A cidade apresenta uma geomorfologia que corrobora os eventos de MGM. O relevo é acidentado, com vertentes bem íngremes, vales profundos e encaixados, altitudes em torno de 1.060 m nas partes mais baixas e 1.400 m no topo da Serra de Ouro Preto. A malha urbana estende-se ocupando tanto o vale principal, como as vertentes e contrafortes das serras que a delimitam (CASTRO, SOBREIRA, *et al.*, 2012).

A Serra de Ouro Preto representa o flanco sul de uma grande estrutura regional conhecida como Anticlinal de Mariana, sendo essa estrutura orientada na direção Leste-Oeste, possuindo as camadas mergulhos gerais para o Sul, na ordem dos 30° (SOBREIRA e FONSECA, 2001). A Figura 5 apresenta um mapa da cidade com indicação aproximada da Serra de Ouro Preto, ao Norte, e da Serra do Itacolomi, ao Sul.

É, portanto, num cenário de relevo acidentado e comprimido entre serras antagônicas que se desenvolveu o núcleo urbano da cidade de Ouro Preto. Com o crescimento natural da cidade e, em função da inexistência de zonas de expansão consistentes, a ocupação das vertentes e encostas tornou-se a opção possível e irreversível, gerando cenários propícios a eventos geotécnicos críticos (FONTES, 2011).



**Figura 5 – Mapa da cidade com indicação aproximada da Serra de Ouro Preto, ao Norte, e da Serra do Itacolomi, ao Sul. Fonte: Google (com modificações).**

### **3.1.2 Histórico de movimentos gravitacionais de massa na área de estudo**

O distrito sede de Ouro Preto apresenta um histórico importante de movimentos de massa. Por diversos anos, principalmente em períodos de chuva intensa, ocorreram movimentos que proporcionaram danos materiais e de vida (CASTRO, 2006). A cidade de Ouro Preto possui um alto índice de acidentes relacionados a movimentos de massa que datam ainda do período colonial, conforme Fontes (2011). Segundo o autor, um acidente em 1814 causou o soterramento do proprietário de uma lavra e todos os seus escravos.

Já na segunda metade do século XX, vários eventos graves foram registrados, com destaque para as ocorrências dos anos de 1996 e 1997, em que foram registrados cerca de 123 registros de ocorrências, com 13 mortes confirmadas (FONTES, 2011). Ainda, seguindo o autor, dados registros mais recentes, evento particularmente crítico

ocorreu em 1979, associado a elevados índices de precipitação pluviométrica (cerca de 1.216 mm) concentrados nos meses de janeiro e fevereiro daquele ano. Já em janeiro de 1997, segundo Bonuccelli e Zuquette (1999), foram registradas 13 mortes na cidade decorrentes de movimentos de massa.

Para a área onde está localizado o Morro da Forca, obteve-se um registro de 33 eventos em todo o centro histórico de 1979 a 2017, com a tendência de que este número possa ser mais elevado, como em todos os outros bairros. A ausência de informações precisas e consistentes também se encontra neste núcleo da cidade (TAVARES, 2018). Ainda segundo a autora, o maior registro de eventos na área é do ano de 1979, conforme relatórios TECNOSOLO (1979), o qual diz que a cidade sofreu um grande evento devido a índices pluviométricos elevados, sem dados exatos, em que ocorreram vários movimentos por todo o município. Segundo relatório do IGA (1994), em 1º de fevereiro de 1979 ocorreu a maior altura de chuva registrada, chegando a 161,0 mm (CASTRO, 2006). Nesse ano ocorreram chuvas muito intensas e prolongadas, causando sérios fenômenos de deslizamentos em taludes, intenso ravinamento, aceleração de processos normalmente lentos de escoamentos superficiais, queda de blocos, desmoronamentos e colapsos de muros de arrimo, resultando em grandes transtornos à população, principalmente aos ocupantes das encostas e conseqüentemente ao poder público (CASTRO, 2006, *apud* CARVALHO, 1982). A Figura 6 apresenta um registro do Casarão Solar Baeta Neves atingindo por um deslizamento da parte do Sul do Morro da Forca, em 1979.



**Figura 6 – Casarão Solar Baeta Neves atingido por um deslizamento da parte Sul do Morro da Forca, provocado pelas chuvas de 1979. Fonte: Portal R7.**

No início de 2012, novos grandes eventos ocorreram na cidade, sob a atuação dos mesmos condicionantes. Um escorregamento proveniente de um MGM atingiu a rodoviária da sede de Ouro Preto, levando duas pessoas a óbito (Figura 7) (XAVIER, 2018). Nesse mesmo ano, devido às intensas chuvas que atingiram a cidade, um novo MGM ocorreu na parte Sul do Morro da Forca, ocasionando a interdição do Casarão Solar Baeta Neves e imóveis adjacentes.

No ano de 2022, um novo grande evento ocorreu na cidade, mais uma vez devido às intensas chuvas que atingiram a cidade. Esse grande evento foi um MGM no Morro da Forca, resultando na destruição do casarão Baeta Neves, importante patrimônio histórico da cidade, datado do final do século XIX, e que já havia sido interditado no ano de 2012 (Figura 8). Ainda, devido à alta pluviosidade registrada no início de janeiro de 2022, houve uma morte na cidade de Ouro Preto, tendo como causa um soterramento decorrente de um movimento gravitacional de massa registrado no Bairro Santa Cruz.



**Figura 7 – Escorregamento da Rua Padre Rolim no ano de 2012. Fonte: Foto de Eduardo Tropia/Ouopress/EFE/VEJA. Adaptado de XAVIER (2018).**



**Figura 8 – Escorregamento de parte do Morro da Forca, em 2022. Fonte: Foto de Roberto Lourenço. Adaptado de Jornal O Liberal.**

A Tabela 5 traz os registros feitos pela Defesa Civil de Ouro Preto no período compreendido entre 1988 e 2009.

De modo geral, existe um elevado registro de MGM no distrito sede de Ouro Preto, o que se deve a diversas características intrínsecas, que, quando associadas, geram um ambiente propício para a deflagração dos eventos (XAVIER, 2018).

**Tabela 5 – Registros de movimentos de massa na área urbana de Ouro Preto: 1988 a 2009. (Defesa Civil de Ouro Preto, 2010). Adaptado de FONTES (2011).**

Ano	Nº de Ocorrências	Nº de Mortes	Locais
1989	32	3	Bairros São Cristóvão, Padre Faria, Taquaral, Piedade e áreas do que no futuro seria denominado Bairro Santa Cruz.
1991	32	-	Bairros São Francisco, Antônio Dias, Pilar, Alto da Cruz, piedade e Padre Faria.
1992	54	2	Bairros São Francisco, Piedade, Alto da Cruz, Padre Faria e Santa Cruz.
1995	40	3	Bairros São Cristóvão, Piedade, Padre Faria, Santa Cruz, Antônio Dias, Água Limpa, Bauxita e Nossa Senhora das Dores.
1996/97	123	13	Bairros Taquaral, São Cristóvão, São Francisco, Alto da Cruz, Piedade, Padre Faria, Santa Cruz e Vila Aparecida.
2001/03	100	-	Bairros São Cristóvão, Alto da Cruz, Piedade, Padre Faria, Santa Cruz e Morro Santana.
2005	54	-	Bairros São Francisco, São Cristóvão, Piedade, Padre Faria, Santa Cruz, Morro Santana, Taquaral, Bauxita e Nossa Senhora das Dores.
2006/07	312	-	Bairros São Francisco, São Cristóvão. Piedade, Padre Faria, Santa Cruz, Morro Santana e Taquaral.
2008	193	-	Bairros São Francisco, São Cristóvão. Piedade, Padre Faria, Santa Cruz, Morro Santana e Taquaral.
2009	89	-	Bairros São Francisco, São Cristóvão. Piedade, Padre Faria, Santa Cruz, Morro Santana e Taquaral.

### **3.1.3 Caracterização dos movimentos gravitacionais de massa mais recorrentes na área de estudo**

Xavier (2018) mapeou 1166 pontos de movimento de massa na cidade de Ouro Preto. Desses, 341 tinham sido classificados como deslizamento sem identificação e outros 246 foram catalogados como deslizamento do tipo translacional. Esses tipos de MGM foram os que mais apareceram em seu mapeamento.

Considerando o arcabouço geológico, o geomorfológico, o climático, a ação antrópica na exploração e ocupação de suas encostas e os dados levantados por Xavier (2018), Ouro Preto apresenta grande propensão a ocorrência de MGM do tipo escorregamento translacional, considerando a classificação proposta por Hungr *et al.* (2014).

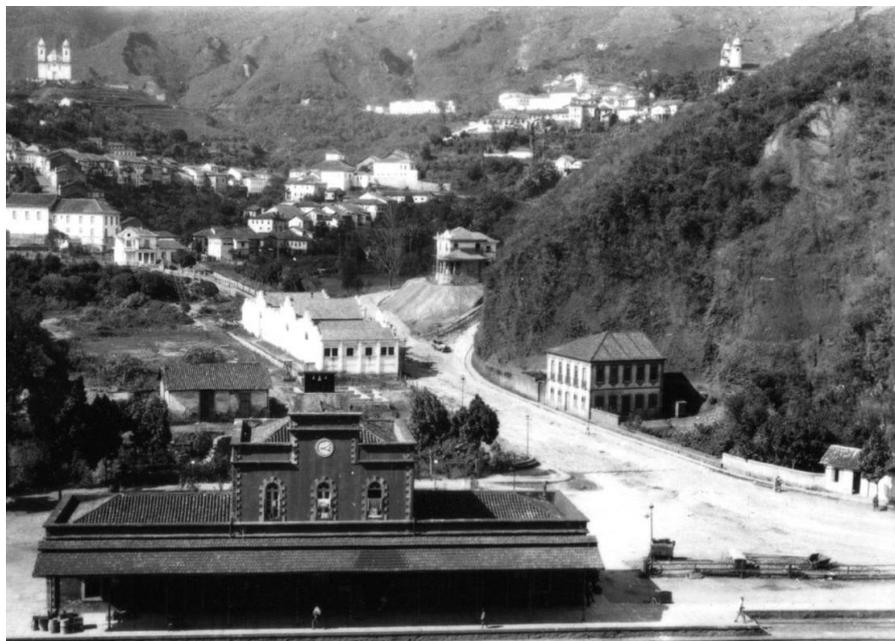
### **3.1.4 Caracterização do evento no Morro da Forca, no Distrito Sede de Ouro Preto**

Em 13 de janeiro de 2022, parte da porção Sul do Morro da Forca, localizado na sede do Distrito de Ouro Preto, desceu, causando a destruição de imóveis adjacentes (Figura 9), sendo um desses o casarão Baeta Neves (Figura 10), datado do final do século XIX. Foi um MGM do tipo escorregamento translacional (Figura 11), tendo como um dos gatilhos as intensas chuvas que atingiram a região no início do ano. A cidade de Ouro Preto apresenta alta taxa pluviométrica durante os meses de verão, o que, juntamente com outros fatores pertinentes à região, favorecem a ocorrência de MGM. Dados do INMET (2022) mostram que, em janeiro de 2022, choveu 462,9mm na cidade de Ouro Preto.

Segundo matéria divulgada pelo portal de notícias CNN, a área atingida vinha sendo monitorada constantemente, estando o casarão e imóveis adjacentes interditados desde 2012 (JUCÁ , LOPES e SERRANO, 2022). Ainda segundo a matéria, a calçada pertencente aos imóveis atingidos havia sido interditada no dia anterior pela Defesa Civil de Ouro Preto, para evitar que pedestres fossem atingidos por eventuais deslizamentos.



**Figura 9 – Vista superior do Morro da Forca antes do movimento gravitacional de massa ocorrido em 13 de janeiro de 2022. Fonte: Google (com modificações).**



**Figura 10 – Fotografia da Estação Ferroviária de Ouro Preto, com vista para o casarão Solar Baeta Neves, em que é possível ver a porção Sul do Morro da Forca que desceu. Fonte: Foto de autor desconhecido.**



**Figura 11 – Escorregamento translacional ocorrido no Morro da Forca, em 2022. Fonte: Foto de Wandrey Cristiano.**

### **3.1.5 Identificação dos processos que desencadearam o evento**

Alguns fatores influenciam no desencadeamento dos movimentos de massa, sendo eles elementos do meio físico e/ou externos (CASTRO, 2006). Ainda segundo a autora, a maioria dos casos de escorregamento em encostas ocorre na época de chuvas, sendo que grande parte no final da estação. A partir disso é comum apresentar a hipótese de que o mecanismo de escorregamento está relacionado com o aumento de poropressões positivas, provenientes da formação de nível d'água na proximidade da superfície ou na mesma das encostas (CASTRO, 2006). Este aumento leva ao alívio da tensão efetiva entre as partículas do solo, diminuindo o contato entre as partículas sólidas, o que acarreta o deslizamento.

Considerando que a região de ocorrência do evento já possuía uma alta suscetibilidade à ocorrência de movimento de massa, as intensas chuvas que atingiram a região àquela época foram o gatilho para a ocorrência do grande escorregamento registrado.

### **3.1.6 Obra de retaludamento no Morro da Forca após a ruptura**

Com a finalidade de fazer o retaludamento do Morro da Forca após a ruptura do dia 13 de janeiro de 2022, a Prefeitura Municipal de Ouro Preto contratou a empresa Destroy Desmonte Técnicos do Brasil Ltda., via dispensa de licitação. As obras de retaludamento tiveram início no dia 28 de fevereiro de 2022 (Figura 12). Além do retaludamento, no contrato com a empresa ainda constam a construção de um muro de arrimo em toda a extensão do local, a aplicação de “atarentagem”, que consiste em uma cortina vegetal, a construção de uma Valeta de Proteção (VP) e, também, um sistema de drenagem no topo e no meio do morro. A empresa também foi a responsável pelas obras na Avenida Lima Júnior (Volta do Vento), outra área atingida pelas intensas chuvas do verão de 2022.



**Figura 12 – Obra de retaludamento no Morro da Forca após a ruptura. Fonte: Foto de Filipe Lage, via Portal Prefeitura de Ouro Preto.**

### 3.1.7 Edificações objeto de estudo

As edificações objeto de estudo ficam nas adjacências do Morro da Força, conforme apresentado na Figura 13. Essas edificações são eminentemente comerciais, sendo elas (Figura 14): o Hotel Nossa Senhora Aparecida e Restaurante e Lanchonete Terra de Minas; Bar e Restaurante Manjuba; Drogaria São Camilo. Ficam muito próximas ao Morro da Força, como pode ser visto nas imagens (Figura 15).



**Figura 13 – Localização das edificações em estudo. Fonte: Google Earth (com modificações).**



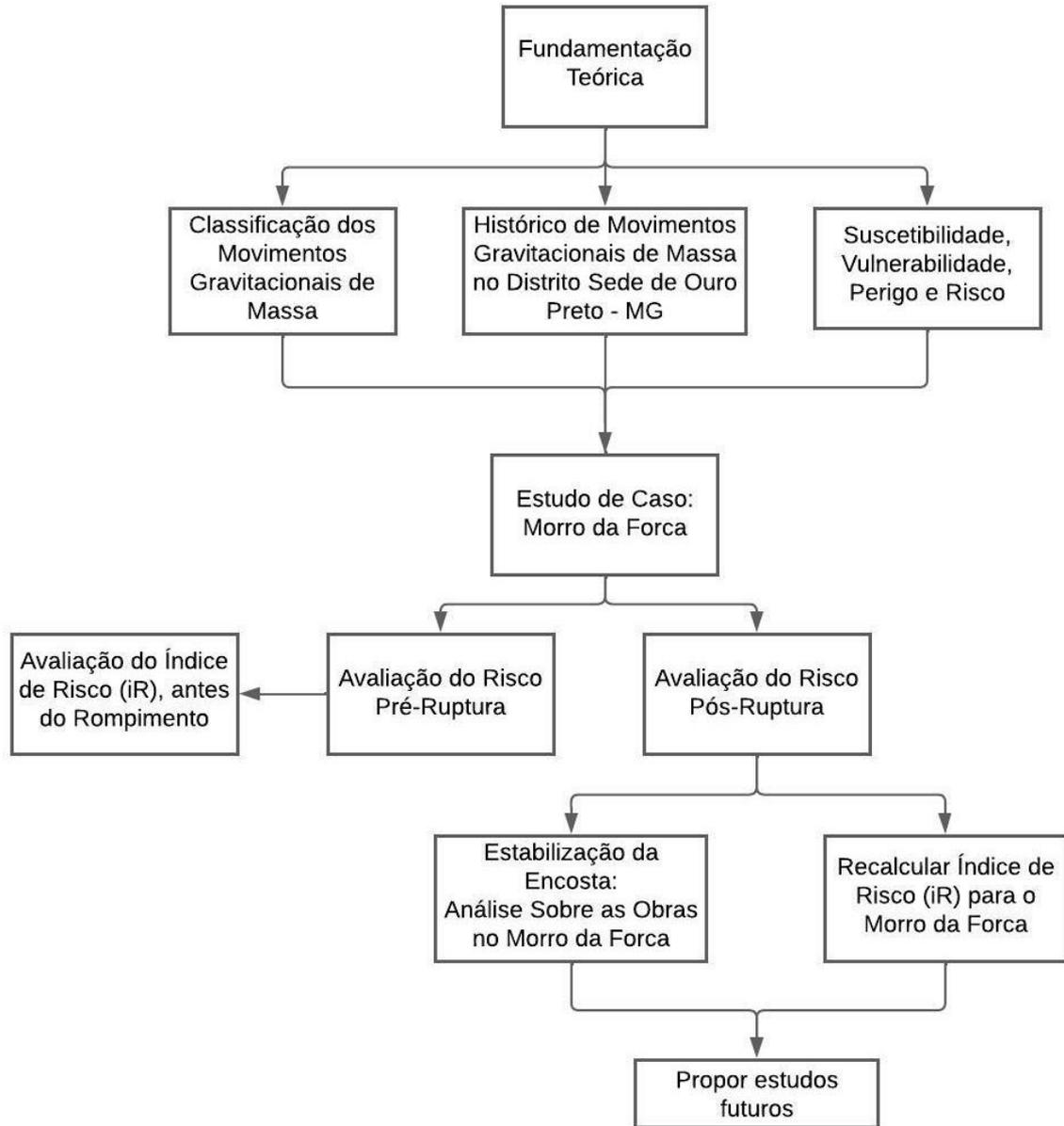
**Figura 14 – Hotel Nossa Senhora Aparecida e Restaurante e Lanchonete Terra de Minas (à esquerda); Bar e Restaurante Manjuba (ao centro); Drogaria São Camilo (à direita). Fonte: Google Earth (com modificações).**



**Figura 15 – Detalhe do Morro da Forca ao fundo das edificações. Fonte: Google Earth (com modificações).**

## 4 METODOLOGIA

O presente trabalho está organizado conforme fluxograma da Figura 16.



**Figura 16 – Fluxograma com a organização do presente trabalho. Fonte: o autor.**

Aplicar-se-á a metodologia para o cálculo do índice de risco (iR), desenvolvida por Tavares (2018). O cálculo será desenvolvido para edificações não atingidas pelo MGM do dia 13 de janeiro de 2022.

#### 4.1 Metodologia proposta para o cálculo do índice de Risco (iR)

A metodologia de Índice de Risco (iR) tem como base parâmetros multicriteriais em que as informações estatísticas extraídas de um banco de dados de eventos são aliadas as observações coletadas em campo. Para tanto, leva-se em consideração parâmetros de probabilidade, vulnerabilidade e fator de correção no cálculo desse Índice de Risco.

##### 4.1.1 Cálculo das probabilidades

O cálculo das probabilidades é baseado em uma série histórica de movimentos gravitacionais de massa. A Tabela 6 apresenta um histórico de acidentes envolvendo movimentos gravitacionais de massa no Distrito Sede do Município de Ouro Preto/MG, para o período compreendido entre os anos de 1979 a 2017, a partir do levantamento de banco de dados de MGM. Durante esse período, totalizando 38 anos de análise, foram identificados 1112 pontos de MGM levantados no Distrito Sede, sendo 805 dentro dos limites dos bairros.

**Tabela 6 – Resumo de Eventos relativos a MGM com o número de eventos por bairro, a frequência e a probabilidade relativas anuais no período de 1979 a 2017.**

**Adaptado de TAVARES (2018).**

VALUE	Bairro	Número de Eventos	Frequência Relativa inicial de MGM	Probabilidade Anual Inicial
1	Vila Aparecida	14	0,017	4,58E-04
2	Vila dos Engenheiros	4	0,005	1,31E-04
3	Saramenha de Cima	5	0,006	1,63E-04
4	Saramenha	16	0,020	5,23E-04
5	Pilar	13	0,016	4,25E-04
6	Passa Dez de Baixo	3	0,004	9,81E-05
7	Lagoa Saramenha	19	0,024	6,21E-04
8	Novo Horizonte	9	0,011	2,94E-04
9	Nossa Senhora do Carmo	17	0,021	5,56E-04
10	Pocinho	22	0,027	7,19E-04
11	Bairro Lagoa	11	0,014	3,60E-04
12	Vila Itacolomi	9	0,011	2,94E-04
13	Tavares	12	0,015	3,92E-04
14	Vila Santa Isabel	3	0,004	9,81E-05

**Tabela 6 (Continuação) – Resumo de Eventos relativos a MGM com o número de eventos por bairro, a frequência e a probabilidade relativas anuais no período de 1979 a 2017. Adaptado de TAVARES (2018).**

VALUE	Bairro	Número de Eventos	Frequência Relativa inicial de MGM	Probabilidade Anual Inicial
15	Morro do Cruzeiro	0	0	0
16	Barra	8	0,010	2,62E-04
17	Centro Histórico	33	0,041	1,08E-03
18	São Francisco	59	0,073	1,93E-03
19	Morro São Sebastião	38	0,047	1,24E-03
20	Vila São José	6	0,007	1,96E-04
21	Jardim Alvorada	7	0,009	2,29E-04
22	N. Senhora de Lourdes	6	0,007	1,96E-04
23	Cabeças	7	0,009	2,29E-04
24	Vila Pereira	2	0,002	6,54E-05
25	Passa Dez de Cima	5	0,006	1,63E-04
26	São Cristóvão	60	0,075	1,96E-03
27	Água Limpa	21	0,026	6,86E-04
28	Rosário	7	0,009	2,29E-04
29	Antônio Dias	21	0,026	6,86E-04
30	N. Senhora das Dores	28	0,035	9,15E-04
31	Santa Cruz	60	0,075	1,96E-03
32	Vitorino Dias	24	0,030	7,85E-04
33	Padre Faria	48	0,060	1,57E-03
34	Alto da Cruz	26	0,032	8,50E-04
35	Taquaral	60	0,075	1,96E-03
36	Piedade	26	0,032	8,50E-04
37	Morro da Queimada	30	0,037	9,81E-04
38	Morro Santana	52	0,065	1,70E-03
39	Morro São João	14	0,017	4,58E-04
40	Campo Grande de Vila Rica	0	0	0
<b>Total de movimentos analisados</b>		805	1	0,0
<b>Anos de Análise (1979 a 2017)</b>		38		

Assim, para o cálculo da probabilidade de acidentes nos bairros do distrito sede, foi feito, primeiramente, o cálculo da frequência relativa de acidentes por bairro, a partir de método estatístico utilizando a relação (Equação 1):

$$f = \frac{F}{n}$$

**Equação 1 – Frequência relativa, para o cálculo de acidentes por bairro.**

Em que:

- f é a frequência relativa;
- F é a frequência absoluta;
- n é a quantidade de dados.

O cálculo da probabilidade relativa foi realizado a partir da relação:

$$P = \frac{f}{T}$$

**Equação 2 – Probabilidade relativa.**

Em que:

- P é a probabilidade relativa;
- f é a frequência relativa;
- T é o intervalo de tempo do banco de dados.

#### **4.1.2 Vulnerabilidades**

Para a vulnerabilidade, foi adotado uma aplicação associada ao nível de danos potenciais ou grau de perdas, expressa numa escala de 0 a 1, mesmo padrão das consequências adotado por Amaral e Silva (2001). Como abordam Fell (1994) e Wong *et al.* (1997), a avaliação da vulnerabilidade envolve, portanto, o conhecimento da interação entre um dado movimento de massa e os elementos afetados. Em essência a vulnerabilidade (V) foi considerada a partir da Equação 3 .

$$V = V_s \times V_t \times V_I$$

**Equação 3 – Vulnerabilidade, calculada a partir do produto das parcelas de vulnerabilidades.**

Em que:

- V é a Vulnerabilidade;
- Vs é a probabilidade espacial de impacto de um MGM em um elemento;
- Vt é a probabilidade temporal de impacto (exemplifica a probabilidade de uma edificação estar ocupada durante o impacto);
- VI é a probabilidade de perda de vidas ou proporção do valor do elemento.

A vulnerabilidade espacial, para o presente estudo, foi avaliada conforme a relação dos elementos em risco e a área total da observação do possível alcance dos fragmentos de rocha ou dos detritos oriundos de um movimento em solo. As observações do possível alcance seguiram de acordo com as observações in loco e de dados históricos passados. A Tabela 7 permite calcular a vulnerabilidade espacial.

**Tabela 7 – Descrição de áreas e estimativa da parcela correspondente a vulnerabilidade Espacial. Oliveira (2004). Adaptado de TAVARES (2018).**

<b>Vulnerabilidade Espacial - Vs</b>	
<b>Descrição</b>	<b>Área (Ha)</b>
Área total estudada	AT
Área definida por meio do estudo da trajetória e da distância máxima alcançada pelos fragmentos de rocha ou detritos, oriundos de escorregamentos - ADM - Área de Distância Máxima	ADM
Área correspondente às residências (edificações) - AR	AR
Vulnerabilidade Espacial (Vs)	$V_s = \frac{AR}{ADM}$

A vulnerabilidade temporal é associada ao tempo de permanência dos indivíduos na edificação (residência, indústria, escola, comércio, prédio público, etc.) e, ainda, ao

período do dia no qual esses acidentes ocorrem com maior frequência. Essa probabilidade apresenta uma grande variabilidade e, realmente, demanda de investigação mais aprofundada. A Tabela 8 apresenta parâmetros da vulnerabilidade temporal.

**Tabela 8 – Estimativas da parcela de vulnerabilidade correspondente à probabilidade temporal para uma família padrão. Oliveira (2004). Adaptado de TAVARES (2018).**

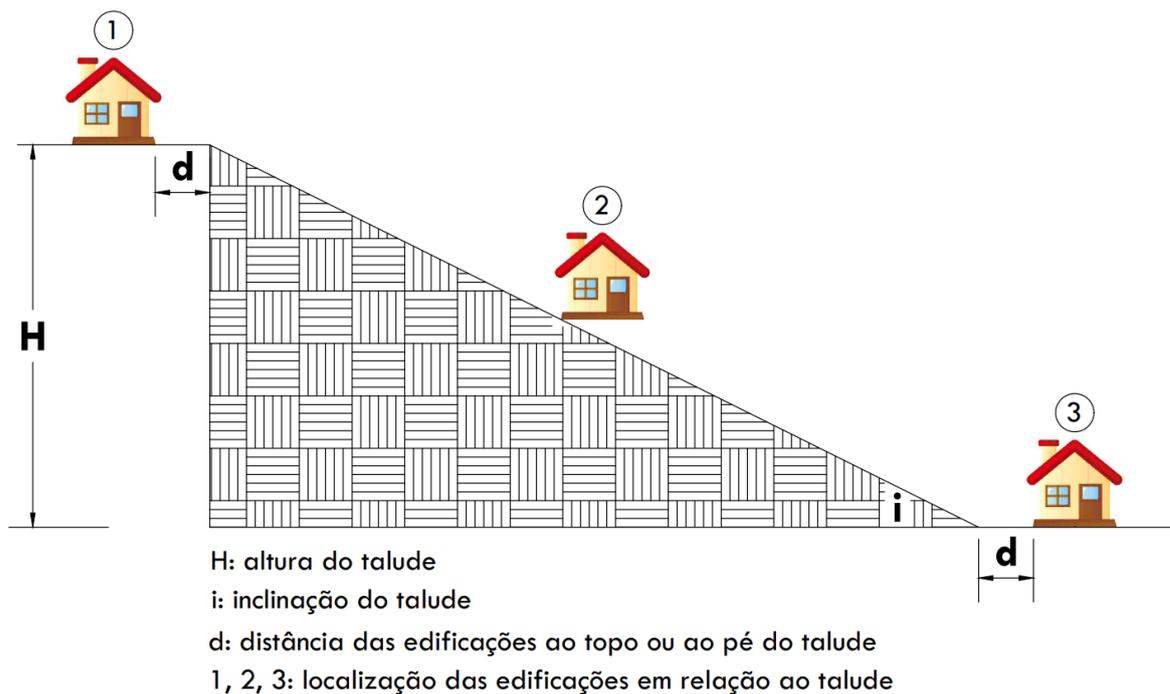
<b>Vulnerabilidade Temporal - VT</b>	
<b>Considerações</b>	<b>VT</b>
Probabilidade dos indivíduos adultos estarem na residência em dias úteis	0,50
Probabilidade dos menores em idade escolar estar na residência em dias úteis	0,60
Probabilidade de o idoso estar na residência em dias úteis	1,00
Probabilidade dos adultos e os menores estarem na residência aos sábados, domingos e feriados	0,70
Probabilidade do idoso estar na residência aos sábados, domingos e feriados	0,90
Probabilidade da família estar na residência ao longo de um ano	0,60 - 0,70

A análise da vulnerabilidade individual considera a existência de estruturas abertas (janelas, portas, varandas) voltadas para a encosta, ainda consideram a proximidade da encosta com a edificação e se existe ou não proteção da residência (barreiras artificiais ou naturais, bosque de árvores robustas). Esses critérios podem definir a ocorrência ou não de vítimas fatais. A Tabela 9 apresenta critérios de vulnerabilidade individual. A vulnerabilidade individual é estimada, também, a partir das características do padrão de construção das edificações e trajetória do movimento que impacta a edificação.

**Tabela 9 – Estimativas da parcela de vulnerabilidade de um indivíduo em sua residência. Oliveira (2004). Adaptado de TAVARES (2018).**

<b>Vulnerabilidade dos indivíduos dentro das residências - VI (Vulnerabilidade Individual) - Movimento em Rocha</b>			
<b>Tipo de Dano</b>	<b>Faixa</b>	<b>Valor Recomendado</b>	
		<b>Casas de madeira ou de alvenaria de tijolos furados sem laje (padrão popular)</b>	<b>Casas construídas com estruturas de concreto armado ou alvenaria autoportante de blocos ou tijolos maciços</b>
Impacto de fragmentos provocando o colapso da residência	0,9 - 1,0	1,0	1,0
Fragmentos passam por algum vão da residência (janelas, basculantes, portas), atingindo compartimentos de grande tempo de permanência	0,8 - 1,0	1,0	0,9
Fragmentos passam por algum vão da residência (janelas, basculantes, portas), atingindo compartimentos de pequeno tempo de permanência	0,6 - 1,0	0,9	0,7
Fragmentos se chocam contra a residência, destruindo-a parcialmente	0,6 - 1,0	0,8	0,6
Fragmentos se chocam com a residência não provocando danos à estrutura	0 - 0,1	0,1	0,05

As observações feitas em campo para as vulnerabilidades das edificações também consideraram a geometria do talude, a localização das edificações e sua distância em relação ao topo ou pé do talude, como exemplifica a Figura 17.



**Figura 17 – Esquema para entendimento da inferência do alcance dos movimentos gravitacionais de massa. Adaptado de TAVARES (2018).**

#### 4.1.3 Fator de correção ( $F_i$ )

Na definição do fator de correção, foram consideradas as estruturas que mais se encontram na região. No centro histórico pós-evento de 1979, foram realizadas várias obras de cortinas atirantadas, sistemas de drenagem pluvial urbano, bem como algumas escadas hidráulicas em encostas pontuais.

A adaptação do método de Amaral e Silva (2001), proposta para o método do índice de risco ( $iR$ ), foi feita para apropriar o cálculo à realidade do Distrito Sede do Município de Ouro Preto/MG, com padronização dos valores aos sistemas executados. Estes valores do  $F_i$ , como sugerido, expressa a correção imposta pelas obras de intervenções realizadas na comunidade (obras de estabilização e urbanização), de forma a expressar a redução da vulnerabilidade da área e, conseqüentemente, o risco a um evento de movimento gravitacional de massa.

A influência das obras de estabilização foi avaliada em 5 categorias, a partir dos fatores de ponderação propostos por Corteletti (2017), apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10 – Fatores de correção em função das obras de intervenção realizadas (Cortelletti, 2017). Adaptado de TAVARES (2018).**

<b>Natureza das obras de intervenção</b>	<b>Peso</b>
Obra de contenção em bom estado de conservação ou talude em boas condições de estabilidade	0,1
Retaludamento + Sistema de drenagem + Cobertura vegetal	0,3
Retaludamento + Sistema de drenagem	0,5
Retaludamento ou obra de contenção insuficiente (estado de conservação ruim ou péssimo)	0,7
Obras inexistentes - área com necessidade de intervenção	1,0

#### **4.1.4 Cálculo do Índice de Risco (iR) proposto**

A partir dos fatores definidos anteriormente, a vulnerabilidade e o risco geológico-geotécnico são fatores dinâmicos na análise de risco e foram embasados no acervo de dados consistentes permitindo a efetiva aferição dos problemas de movimentos gravitacionais de massa e uma intervenção rápida e hierarquizada de trabalho de mitigação na área. Posto isso, tem-se a relação indicada na Equação 4:

$$iR = P \times (V \times Fi)$$

#### **Equação 4 – Índice de Risco.**

Em que:

- iR é o Índice de Risco;
- P é a probabilidade relativa anual;
- V é a vulnerabilidade;
- Fi é o fator de correção para os locais com obras que minimizaram o risco na área em estudo.

A metodologia proposta, por meio de fatores já definidos em outras metodologias anteriormente publicadas, é uma forma de dar aos fiscais uma melhor compreensão das análises a serem feitas *in loco*.

#### 4.1.5 Aceitabilidade e escala de classificação do risco geológico

Costa (2005) aponta que parece razoável concluir que o risco involuntário (aquele em que o indivíduo é exposto de forma imposta) é mais comumente aceitável quando da ordem de  $10^{-6}$  por ano e não mais do que  $10^{-5}$  por ano. Valores mais altos são aceitos para riscos voluntários (aqueles em que o próprio indivíduo se expõe, como dirigir um veículo, por exemplo). Para esses casos, riscos entre  $10^{-3}$  e  $10^{-4}$  por ano são comuns e podem ser tomados como típicos de riscos voluntários. Assim, um risco voluntário de  $10^{-3}$  por ano parece ser o máximo tolerável.

Utilizando essa definição, pode-se produzir uma escala de classificação para o índice de risco, apresentada na Tabela 11.

**Tabela 11 – Escala de classificação do índice de risco.**

CLASSIFICAÇÃO DO ÍNDICE DE RISCO	
$iR < 10^{-6}$	MUITO BAIXO
$10^{-6} \leq iR < 10^{-5}$	BAIXO
$10^{-5} \leq iR \leq 10^{-3}$	MODERADO
$10^{-3} < iR$	ALTO

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Exemplo de estudo desenvolvido por Tavares (2018) para o casarão Solar Baeta Neves e as outras edificações atingidas no evento do dia 13 de janeiro de 2022

A título de exemplo, é apresentado na Tabela 12, o índice de risco, calculado por Tavares (2018), para o casarão Solar Baeta Neves e as outras edificações que foram atingidas pelo MGM do dia 13 de janeiro de 2022.

**Tabela 12 – Cálculo do Índice de Risco (iR) para o Morro da Forca. Adaptado de TAVARES (2018).**

ÍNDICE DE RISCO PARA O MORRO DA FORCA - PRÉ-RUPTURA			
P	V	Fi	iR
1,08E-03	0,27	1,0	<b>2,92E-04</b>

Em que:

- P é a probabilidade relativa anual;
- V é a vulnerabilidade;
- Fi é o fator de correção para os locais com obras que minimizaram o risco na área em estudo;
- iR é o Índice de Risco.

## **5.2 Avaliação do Risco Pré-Ruptura para edificações não atingidas no evento do dia 13 de janeiro de 2022**

### **5.2.1.1 Probabilidade relativa inicial**

Para o cálculo da probabilidade relativa inicial, considerar-se-á os dados apresentados na Tabela 13, que se constituem dos dados levantados por Tavares (2018) para o período de 1979 a 2017 (Tabela 6), acrescidos de uma quantidade calculada a partir da frequência relativa anual para o período de 2017 a 2022. Isso foi feito uma vez que não foi possível a obtenção do levantamento dos dados sobre MGM junto à Defesa Civil de Ouro Preto para o período de 2017 a 2022.

No estudo feito por Tavares (2018) foram registrados 33 eventos para o período de 1979 a 2017, enquanto, por meio da frequência relativa anual, para o período de 1979 a 2022, foram calculados 36 eventos envolvendo MGM (desconsiderando o evento de 13 de janeiro de 2022), conforme pode ser observado na Tabela 13.

**Tabela 13 – Resumo de eventos de MGM calculado a partir da soma dos dados levantados por Tavares (2018) somados à frequência relativa anual para o período de 2017 a 2022.**

<b>Bairro</b>	<b>Número de Eventos</b>
Centro Histórico	36

Sendo assim, a probabilidade relativa inicial para a pré-ruptura é apresentada na Tabela 14.

**Tabela 14 – Probabilidade relativa para a pré-ruptura.**

F	n	f	T	P
36	910	0,042	43	9,53E-04

Em que:

- F é a frequência absoluta;
- n é a quantidade de dados;
- f é a frequência relativa;
- T é o intervalo de tempo do banco de dados;
- P é a probabilidade relativa;

#### **5.2.1.2 Vulnerabilidades**

Foram feitas algumas considerações para os cálculos das vulnerabilidades, uma vez que houve que estão sendo consideradas outras edificações, que são diferentes daquelas objeto de estudo no trabalho de Tavares (2018). As edificações objeto de estudo estão apresentadas na Figura 18.

- Vulnerabilidade Espacial ( $V_s$ )

Para a Vulnerabilidade Espacial ( $V_s$ ), considerou a área total (AT) como a área das edificações, conforme apresentada na Figura 18. Para a Área de Distância Máxima (ADM), foi adotado o mesmo potencial de alcance, uma vez que esse parâmetro é baseado em aspectos de observação local, considerando-se dados históricos do alcance dos detritos oriundos de MGM de movimentos anteriores. A Tabela 15 apresenta o cálculo da vulnerabilidade espacial ( $V_s$ ).

**Tabela 15 – Parâmetros para o cálculo da Vulnerabilidade Espacial (Vs).**

Vulnerabilidade Espacial - Vs	
Descrição	Área (Ha)
Área total estudada	1,61
Área definida por meio do estudo da trajetória e da distância máxima alcançada pelos fragmentos de rocha ou detritos, oriundos de escorregamentos - ADM - Área de Distância Máxima	0,76
Área correspondente às residências e aos pontos comerciais (edificações) - AR	0,14
Vulnerabilidade Espacial (Vs)	$V_s = 0,18$



**Figura 18 – A: área vulnerável a sofrer danos por um novo MGM; B e C: detalhes de edificações próximas ao pé do Morro da Forca. Fonte: Google Earth (com modificações).**

- Vulnerabilidade Temporal (Vt)

Considerando que dentre as edificações presentes próximas ao pé do Morro da Forca existe há um hotel, foi considerado a pior situação. Logo, tem-se para a vulnerabilidade temporal o valor proposto conforme a Tabela 16.

**Tabela 16 – Vulnerabilidade Temporal (Vt).**

Vulnerabilidade Temporal - Vt	
Probabilidade de o idoso estar na residência em dias úteis	1,00

- Vulnerabilidade Individual (VI)

Conforme a Tabela 9, as edificações analisadas, usadas como parâmetro para o cálculo da vulnerabilidade individual, são do tipo “popular”. Sendo assim, tem-se os resultados da Tabela 17.

**Tabela 17 – Vulnerabilidade Individual (VI).**

Vulnerabilidade Individual - VI	
Fragmentos passam por algum vão da residência (janelas, basculantes, portas), atingindo compartimentos de grande tempo de permanência	1,0

- Vulnerabilidades

De posse desses valores, tem-se, conforme a Tabela 18, o valor para Vulnerabilidades, considerando o momento pré-evento.

**Tabela 18 – Vulnerabilidades para o momento pré-ruptura, calculada a partir da Equação 3.**

VULNERABILIDADES DA ÁREA		
Vulnerabilidade Espacial - Vs	0,18	Cálculo das áreas
Vulnerabilidade Temporal - Vt	1,0	Probabilidade dos indivíduos adultos estarem na edificação em dias úteis
Vulnerabilidade Individual - VI	1,0	Fragmentos passam por algum vão da residência (janelas, basculantes, portas), atingindo compartimentos de grande tempo de permanência
$V (Vs \times Vt \times VI) = 0,18$		

### 5.2.1.3 Fator de Correção (Fi)

Como nesse momento não havia obras de contenção, considerou-se um Fator de Correção (Fi) conforme demonstrado na Tabela 19.

**Tabela 19 – Fator de Correção (Fi) para a pré-ruptura.**

Fator de Correção (Fi)	
Obras inexistentes - área com necessidade de intervenção	1,0

### 5.2.1.4 Cálculo do Índice de Risco (iR) para pré-ruptura

De posse desses parâmetros, tem-se o índice de risco global para o Morro da Forca, para a pré-ruptura (Tabela 20).

**Tabela 20 – Cálculo do Índice de Risco (iR) para a pré-ruptura, calculada a partir da Equação 4.**

ÍNDICE DE RISCO PARA O MORRO DA FORCA – PRÉ-RUPTURA			
P	V	Fi	iR
9,53E-04	0,18	1,0	<b>1,72E-04</b>

### **5.3 Avaliação do Risco Pós-Ruptura para edificações não atingidas no evento dia 13 de janeiro de 2022**

#### **5.3.1 Estabilização da Encosta: Análise Sobre as Obras no Morro da Forca**

O processo de estabilização do Morro da Forca foi feito por meio da retirada do material de solo, rocha e matéria orgânica descendentes do deslizamento. Em seguida, foi feito o retaludamento (reconfiguração da encosta do morro).

No final do mês de abril de 2022, em contato feito via telefone com a Secretaria de Obras da Prefeitura Municipal de Ouro Preto, esta informou que a intenção é que sejam feitas obras de contenção no Morro da Forca, mas que ainda não foi definido o tipo de contenção que seria realizada, sendo consideradas a tela armada ou muro atirantado. Ademais, está em projeto a construção de obras de drenagem no local, além da realização de cobertura vegetal. Ainda segundo a secretaria de obras, estão sendo realizados estudos de sondagem no local, por meio de ensaio de sondagem rotativa e SPT (*Standard Penetration Test*).

### 5.3.2 Índice de Risco Pós-Ruptura – Retaludamento

#### 5.3.2.1 Probabilidade relativa inicial

Para o cálculo da probabilidade relativa inicial, considerar-se-á os mesmos dados apresentados na Tabela 13 acrescido do episódio do dia 13 de janeiro de 2022. Sendo assim, a probabilidade relativa inicial para o momento pós-ruptura, considerando apenas o retaludamento, é apresentada na Tabela 21.

**Tabela 21 – Probabilidade relativa para a pós-ruptura, calculada a partir da Equação 2, considerando apenas o retaludamento.**

F	n	f	T	P
37	911	0,042	43	9,53E-04

Em que:

- F é a frequência absoluta;
- n é a quantidade de dados;
- f é a frequência relativa;
- T é o intervalo de tempo do banco de dados;
- P é a probabilidade relativa;

#### 5.3.2.2 Vulnerabilidades

Como não houve mudança nos parâmetros das Vulnerabilidades no momento pós-ruptura - retaludamento, considerar-se-á os resultados encontrados no item 4.1.1.2. Assim, tem-se os resultados apresentados na Tabela 22.

**Tabela 22 – Vulnerabilidades para o momento pós-ruptura, calculada a partir da Equação 3, considerando apenas o retaludamento.**

VULNERABILIDADES DA ÁREA		
Vulnerabilidade Espacial - Vs	0,18	Cálculo das áreas
Vulnerabilidade Temporal - Vt	1,0	Probabilidade dos indivíduos adultos estarem na edificação em dias úteis
Vulnerabilidade Individual - VI	1,0	Fragmentos passam por algum vão da residência (janelas, basculantes, portas), atingindo compartimentos de grande tempo de permanência
$V (Vs \times Vt \times VI) = 0,18$		

### 5.3.2.3 Fator de Correção (Fi)

Como nesse momento ainda não havia obras de contenção, existindo apenas o retaludamento, considerou-se um Fator de Correção (Fi) conforme demonstrado na Tabela 23.

**Tabela 23 – Fator de Correção (Fi) para a pós-ruptura, considerando apenas o retaludamento.**

Fator de Correção (Fi)	
Retaludamento ou obra de contenção insuficiente (estado de conservação ruim ou péssimo)	0,7

#### 5.3.2.4 Cálculo do Índice de Risco (iR) para pós-ruptura, considerando apenas o retaludamento

De posse desses parâmetros, tem-se o índice de risco global para o Morro da Forca, para a pós-ruptura, considerando apenas o retaludamento (Tabela 24).

**Tabela 24 – Cálculo do Índice de Risco (iR) pós-ruptura, calculado a partir da Equação 4, considerando apenas o retaludamento.**

ÍNDICE DE RISCO PARA O MORRO DA FORCA – PÓS-RUPTURA			
P	V	Fi	iR
9,53E-04	0,18	0,7	<b>1,20E-04</b>

### 5.3.3 Índice de Risco Pós-Ruptura – Retaludamento e Obras de Contenção

#### 5.3.3.1 Probabilidade relativa inicial

A probabilidade relativa inicial será a mesma para a pós-ruptura – retaludamento, calculada no tópico 4.2.2.1, uma vez que não houve mudanças nos parâmetros. Sendo assim, a probabilidade relativa inicial para o momento pós-ruptura, considerando retaludamento, obra de contenção e cobertura vegetal, é apresentada na Tabela 25.

**Tabela 25 – Probabilidade relativa para a pós-ruptura, calculada a partir da Equação 2, considerando o retaludamento e as obras de contenção.**

F	n	f	T	P
37	911	0,042	43	<b>9,53E-04</b>

Em que:

- F é a frequência absoluta;
- n é a quantidade de dados;
- f é a frequência relativa;
- T é o intervalo de tempo do banco de dados;
- P é a probabilidade relativa;

#### 5.3.3.2 Vulnerabilidades

Como não houve mudanças nos parâmetros das Vulnerabilidades em relação ao momento pós-ruptura - retaludamento, considerar-se-á os mesmos resultados encontrados no item 4.2.2.2. Assim, tem-se os resultados apresentados na Tabela 26.

**Tabela 26 – Vulnerabilidades para o momento pós-ruptura, calculada a partir da Equação 3, considerando o retaludamento e as obras de contenção.**

VULNERABILIDADES DA ÁREA		
Vulnerabilidade Espacial - Vs	0,18	Cálculo das áreas
Vulnerabilidade Temporal - Vt	1,0	Probabilidade dos indivíduos adultos estarem na edificação em dias úteis
Vulnerabilidade Individual - Vi	1,0	Fragmentos passam por algum vão da residência (janelas, basculantes, portas), atingindo compartimentos de grande tempo de permanência
$V (Vs \times Vt \times Vi) = 0,18$		

### 5.3.3.3 Fator de Correção (Fi)

Como nesse momento previa-se obras de contenção, sistema de drenagem e cobertura vegetal, considerou-se um Fator de Correção (Fi) conforme demonstrado na Tabela 27.

**Tabela 27 – Fator de Correção (Fi) para a pós-ruptura, considerando o retaludamento e as obras de contenção.**

Fator de Correção (Fi)	
Retaludamento + Sistema de drenagem + Cobertura vegetal	0,3

#### 5.3.3.4 Cálculo do Índice de Risco (iR) para pós-ruptura, considerando apenas o retaludamento

De posse desses parâmetros, tem-se o índice de risco global para o Morro da Forca, para a pós-ruptura, considerando o retaludamento e as obras de contenção (Tabela 28).

**Tabela 28 – Cálculo do Índice de Risco (iR) pós-ruptura, calculado a partir da Equação 4, considerando o retaludamento e as obras de contenção.**

ÍNDICE DE RISCO PARA O MORRO DA FORCA – PÓS-RUPTURA			
P	V	Fi	iR
9,53E-04	0,18	0,3	<b>5,15E-05</b>

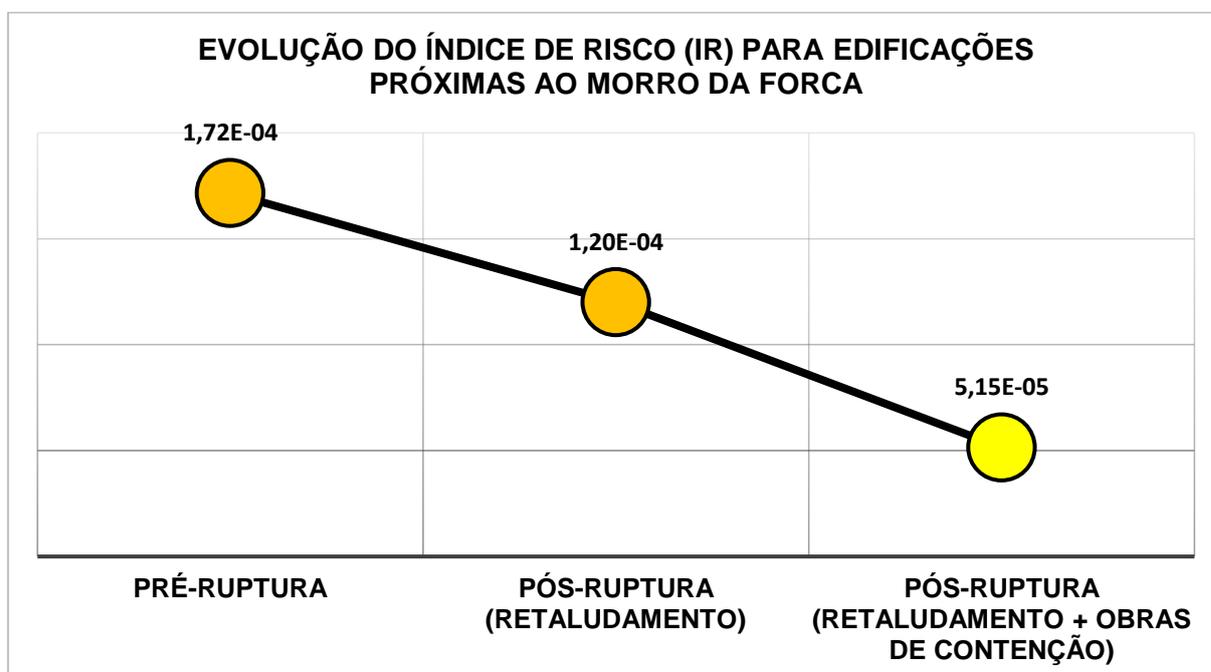
#### 5.4 Discussão dos resultados

Os resultados encontrados estão reunidos na Tabela 29. Percebe-se que não houve alteração para a probabilidade e para a vulnerabilidade, havendo influência direta do fator de correção nas diferenças para os índices de risco calculados.

**Tabela 29 – Resumo dos resultados encontrados para o índice de risco.**

Momento	Probabilidade (P)	Vulnerabilidade (V)	Fator de Correção (Fi)	Índice de Risco (iR)
Pré-Ruptura	9,53E-04	0,18	1,0	1,72E-04
Pós-Ruptura (retaludamento)	9,53E-04	0,18	0,7	1,20E-04
Pós-Ruptura (retaludamento e obras de contenção)	9,53E-04	0,18	0,3	5,15E-05

O gráfico da Figura 19 mostra a evolução para o índice de risco nos três momentos considerados.



**Figura 19 – Gráfico da evolução do índice de risco (iR). Fonte: o autor.**

## 6 CONCLUSÃO

A metodologia proposta se mostrou prática na busca pelos resultados, trazendo-os com base em histórico de eventos e características intrínsecas do local estudado. Essas mesmas características são amplamente usadas em outras metodologias de cálculo do índice de risco envolvendo eventos geotécnicos, o que fornece confiabilidade aos resultados encontrados. Os resultados para o índice de risco são apresentados de forma dinâmica, por meio de uma quantificação numérica e por meio de uma qualificação visual instantânea (escala de cores).

Os resultados obtidos se apresentam dentro de um intervalo-limite esperado, tendo em vista o histórico e a ocorrência de MGM na cidade de Ouro Preto e no local estudado. Para o momento pré-evento do dia 13 de janeiro de 2022 e para o momento pós-evento (a essa mesma data), considerando apenas o retaludamento, vê-se que ambos os índices de risco são da ordem de  $10^{-4}$ , o que lhes confere uma classificação como “risco moderado”, dentro da classificação apresentada no item 3.1.5. Para o momento pós-evento, considerando o retaludamento e obras de contenção, vê-se que o índice de risco decresce, ficando na casa da ordem de  $10^{-5}$ , o que lhe confere uma classificação como “risco baixo”.

Essa diferença apresentada para os índices pré e pós-evento tem muita influência do Fator de Correção ( $F_i$ ), que se difere muito entre os momentos em virtude das intervenções feitas, ou não, no local de estudo. A Vulnerabilidade ( $V$ ) também tem influência, mas de forma secundária, considerando que essa pode variar em virtude das características de uso, proximidade quanto ao objeto geotécnico e tamanho das edificações.

É importante frisar que este estudo é eminentemente de caráter qualitativo, apesar de serem usados cálculos para essa finalidade. Sendo assim, não é o objetivo desse trabalho ser um instrumento determinístico quanto ao risco geotécnico das edificações apresentadas ou mesmo do Morro da Forca. Isso porque alguns fatores não foram considerados e outros foram simplificados por finalidade acadêmica, como o histórico de MGM para o período de 2017 a 2022, por exemplo, o qual foi considerando dentro de uma frequência relativa histórica. Outrossim, corrobora isso o fato de as obras de

contenção serem previstas no momento em que este trabalho foi desenvolvido. Portanto, se tais obras não forem realizadas, o índice de risco classificado como “baixo” não poderá ser aplicado.

Ademais, o índice de risco encontrado para o momento pós-evento, com o retaludamento e as obras de contenção (Tabela 28), gera um alerta de que, mesmo considerando essas, aquele ainda não atingiu um patamar qualitativo de alta segurança. Em outras palavras, apesar das tratativas de minimização do risco, esse não deve ser desconsiderado. Nesse sentido, as edificações objeto de estudo ainda carecem de uma atenção especial por parte da Defesa Civil, das entidades e dos órgãos competentes.

### **6.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Considerando que esse trabalho foi eminentemente de cunho qualitativo, sugere-se que sejam feitos trabalhos determinísticos para avaliação da estabilidade da encosta, tais como determinar as características do solo e da rocha ali presentes, a fim comprovar e colaborar com o índice de risco calculado de forma qualitativa. Ainda, sugere-se mais monitoramento por parte da Defesa Civil e mais trabalhos conjuntos dessa com a Universidade Federal de Ouro Preto, visando a uma monitoração constante, considerando que o risco é dinâmico ao longo do tempo.

De resto, como outra sugestão, sugere-se que novos trabalhos devem ser realizados de forma periódica para promover um maior controle sobre a estabilidade da encosta, considerando, também, outras edificações próximas ao Morro da Forca. Nesse sentido, recomenda-se uma atualização do índice de risco desenvolvido por Tavares (2018).

## REFERÊNCIAS

BONUCCELLI, T.; ZUQUETTE, L. V. Movimentos gravitacionais de massa e erosões na cidade histórica de Ouro Preto, Brasil. **Revista Portuguesa de Geotecnia**, 1999.

BRASIL. LEI No 6.766, DE 19 DE DEZEMBRO DE 1979, 1979. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l6766.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6766.htm)>. Acesso em: 04 janeiro 2022.

BRASIL. LEI Nº 12.608, DE 10 DE ABRIL DE 2012, 2012. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm)>. Acesso em: 04 janeiro 2022.

BRASIL. DECRETO Nº 10.692, DE 3 DE MAIO DE 2021, 2021. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2021/Decreto/D10692.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Decreto/D10692.htm)>. Acesso em: 04 janeiro 2022.

CASTRO, J. M. G. **PLUVIOSIDADE E MOVIMENTOS DE MASSA NAS ENCOSTAS DE OURO PRETO**. Ouro Preto. 2006.

CASTRO, J. M. G. et al. Proposição de procedimento preventivo de riscos geológicos em Ouro Preto - BR com base em histórico de ocorrências e sua correlação com a pluviosidade. **Revista Brasileira de Geociências**, p. 58-66, março 2012.

COELHO, N. Prefeitura de Ouro Preto. **Prefeitura de Ouro Preto**, 2022. Disponível em: <<https://ouropreto.mg.gov.br/noticia/2392>>. Acesso em: 10 março 2022.

CORTELETTI, R.. **Metodologia para Análise de Riscos Geológico-Geotécnicos em Ferrovias: Estrada de Ferro Carajás (EFC)**. Ouro Preto: UFOP, 2017.

COSTA, E. A. D. **AVALIAÇÃO DE AMEAÇAS E RISCO GEOTÉCNICO APLICADOS À ESTABILIDADE DE TALUDES**. universidade federal do rio grande do sul. Porto Alegre - RS. 2005.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslide Types and Processes. In: CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. **Landslides: Investigation and Mitigation**. [S.l.]: [s.n.], 1996. Cap. 3.

FERNANDES, N. **MANUAL DE MAPEAMENTO DE PERIGO E RISCO A MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA**. UFRJ. Rio de Janeiro. 2018.

FERNANDES, N. F. et al. Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, outubro 2001. ISSN 1 (2001) 51-71.

FONTES, M. M. M. **CONTRIBUIÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE, GESTÃO E CONTROLE DE RISCOS GEOTÉCNICOS PARA A ÁREA URBANA DA CIDADE DE OURO PRETO**. Ouro Preto: [s.n.], 2011.

HIGHLAND, L.; BOBROWSKY, P. **The Landslide Handbook - A Guide to Understanding Landslides**. Virginia: USGS, 2008.

HUNGR, O.; LEROUEIL, S.; PICARELLI, L. The Varnes classification of landslide types, an update, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Suscetibilidade a deslizamentos do Brasil: primeira aproximação**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2019.

JUCÁ, J.; LOPES, ; SERRANO, L. CNN Brasil. **CNN Brasil**, 2022. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/deslizamento-em-morro-no-centro-historico-de-ouro-preto-destroi-casaro-es-em-mg/>>. Acesso em: 27 março 2022.

LAVELL, A. **Gestión de Riesgos Ambientales Urbanos**. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. [S.l.]. 2001.

NASCIMENTO, P. **R7**, 2022. Disponível em: <<https://noticias.r7.com/minas-gerais/ouro-preto-risco-em-encosta-que-desabou-e-investigado-ha-sete-anos-14012022>>. Acesso em: 03 abril 2022.

SOBREIRA, F. G.; FONSECA, M. A. Impactos físicos e sociais de antigas atividade de mineração em Ouro Preto, Brasil. **Geotecnia**, Ouro Preto, julho 2001.

TAVARES, V. L.. **PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA ÍNDICE DE RISCO (iR) NO DISTRITO SEDE DO UNICÍPIO DE OURO PRETO/MG: UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A HIERARQUIZAÇÃO DASÁREAS E RISCO E AS TOMADAS DE DECISÕES**. Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP. Ouro Preto - MG. 2018.

USGS. **Landslide Types and Processes**. [S.l.]. 2004.

XAVIER, M. O. **MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA UTILIZANDO A ANÁLISE ESTATÍSTICA DO VALOR INFORMATIVO APLICADA AO DISTRITO SEDE DA CIDADE HISTÓRICA DE OURO PRETO-MG**. OURO PRETO. 2018.

ZÊZERE, J. L. **Dinâmica de vertentes e riscos geomorfológicos**. Programa. Universidade de Lisboa. Lisboa. 2005. (ISBN: 972-636-157-5).