

## A METODOLOGIA FMEA (FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS) APLICADA À GESTÃO DE RISCOS DE ESCORREGAMENTOS DE SOLO EM PORTO, PORTUGAL

*FMEA (FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS) METHODOLOGY APPLIED TO THE RISK  
MANAGEMENT OF LANDSLIDES IN PORTO, PORTUGAL*

**Luciene Oliveira MENEZES<sup>1</sup>, António VIANA DA FONSECA<sup>2</sup>, Maria Giovana PARISI<sup>1</sup>,  
Maria Luisa BORGES<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte – MG. Brasil. E-mail: cienemenezes@yahoo.com.br; mgparizzi18@gmail.com

<sup>2</sup>Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. R. Dr. Roberto Frias, s/n. Porto – Portugal. E-mail: viana@fe.up.pt

<sup>3</sup>Departamento de Proteção Civil - Câmara Municipal do Porto - Divisão Municipal de Planeamento e Monitorização de Risco. Largo Duque da Ribeira, 47. Porto – Portugal. E-mail: luisaborges@cm-porto.pt

Introdução  
O método *FMEA*  
Contexto de riscos  
Síntese fisiográfica e geológico-geotécnica do Porto  
Metodologia  
Análise de suscetibilidade e definição dos taludes avaliados  
Etapas do *FMEA* e planilha síntese  
Desenvolvimento da ficha de perigosidade  
Desenvolvimento da ficha de consequências  
Matriz de risco  
Resultados e discussões  
Índices de perigosidade e consequências por talude  
Matrizes de risco  
Planilha *FMEA*  
Conclusões  
Agradecimentos  
Referências

**RESUMO** - A metodologia *FMEA* – *Failure Mode and Effects Analysis* é citada em normas internacionais de gestão de riscos e com aplicações já conhecidas em barragens e indústrias em geral, que por meio da análise de modos de falha e seus efeitos busca analisar riscos antes que os eventos danosos se concretizem. O objetivo principal desta pesquisa é propor e adaptar essa metodologia para a gestão de riscos de escorregamentos de solo no âmbito da Proteção Civil do Porto, de forma a possibilitar menores discrepâncias entre avaliadores e fomentar a discussão dos riscos em equipe. Para tal, as seguintes etapas são propostas: i) definição dos taludes a serem avaliados; ii) desenvolvimento de uma ficha de campo para análise de perigosidade e consequências atribuindo pontos para os índices de acordo com sua criticidade; iii) análise do risco com definição de cenários, e combinação dos resultados de perigosidade e consequências em uma matriz e planilha. Foram identificados oito taludes de solo com graus de risco diferentes, e os resultados indicam a aplicabilidade do método *FMEA*, principalmente quando associado à ficha de campo com índices quantitativos, que minimiza as discrepâncias nas análises e facilita a escolha de ações preventivas, mitigatórias ou corretivas.

**Palavras-chave:** Riscos Geológico-geotécnicos. Proteção e Defesa Civil. Taludes de Solo. *FMEA*.

**ABSTRACT** - The *FMEA* - Failure Mode and Effects Analysis methodology is cited in international risk management standards and with use already known in dams and industries in general, which, through the analysis of failure modes and their effects, aims to analyze risks before the events harmful to materialize. The main objective of this research is to propose and adapt the methodology for landslide risk management within the scope of the Civil Protection of Porto, Portugal, in order to allow for lesser discrepancies between evaluators and to encourage the discussion of risks as a team. For such, the following steps are proposed: i) definition of the slopes to be evaluated; ii) development of a field sheet for the analysis of hazards and consequences, attributing points to the indices according to their criticality; iii) risk analysis with definition of scenarios, and combination of hazard and consequences results in a matrix and informative table. Eight soil slopes with different degrees of risk were identified, and the results indicate the applicability of the *FMEA* method, especially when associated with the field record with quantitative indices, which minimizes discrepancies in the analyzes and facilitates the choice of preventive, mitigating or corrective actions.

**Keywords:** Geological-geotechnical risks. Civil Protection. Soil Slopes. *FMEA*.

### INTRODUÇÃO

#### O Método *FMEA*

Segundo Petronilho (2010), uma das primeiras descrições do método *Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)* encontra-se na norma *Mil-STD-1629A* (1980), desenvolvida pelo exército americano, e define a forma básica para se ana-

lisar um sistema e seus modos de falhas, os impactos potenciais e a gravidade das consequências na gestão de riscos. A partir do ano de 2000, essas técnicas foram difundidas e oportunamente o *FMEA* consta na norma internacional ISO 31010 (2012) como um dos 31 métodos indicados

para gestão de riscos de um modo geral. Em síntese, o método avalia riscos em uma matriz bidimensional, que pode ter diferentes eixos a depender da aplicação, como probabilidade de ocorrência de um evento danoso, e no outro eixo as consequências; ou perigo e vulnerabilidade. A ordem da matriz, a definição de quais variáveis serão adotadas para os eixos, e principalmente a forma de se obter essas variáveis (se por análise qualitativa, quantitativa ou semiquantitativa) são as principais adaptações a serem realizadas no método. Além da matriz, os resultados do método são apresentados em uma tabela, com possibilidade de se avaliar vários modos de falha para um mesmo talude e de fácil visualização para discussão em equipe.

### **Contexto de riscos**

Em termos de metas globais para a redução de riscos e desastres há uma mudança de paradigma com o Marco de Sendai, que tem o foco na prevenção de riscos, além da resposta ao desastre, bem como no fortalecimento dos municípios e na gestão integrada dos riscos em diferentes escalas de análise; na recomendação do estudo de mecanismos típicos de deslizamentos em escala local; e na identificação dos principais processos, fatores condicionantes e deflagradores dos movimentos de massa com implementação de ferramentas de análise de estabilidade por equilíbrio limite (UNDRR, 2019). Nesse contexto, a ficha de campo desenvolvida busca considerar análises de estabilidade para definição dos índices de perigosidade, de acordo com as características geotécnicas dos solos locais.

No contexto nacional, a ANEPC – Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil de Portugal, sob a tutela do Ministério da Administração Interna do Estado, é a responsável pelas atribuições no âmbito do planejamento civil de emergência, da previsão e gestão de riscos dentre outras atribuições. Essa instituição publicou em ANPC (2009) a sugestão para adotar a matriz de risco de 5 x 5 (perigo x consequências), e critérios qualitativos para a determinação desses parâmetros, o que está em alinhamento com o método *FMEA*. No município do Porto, Borges (2017) desenvolveu uma metodologia para análise de risco de taludes rochosos e estabeleceu uma ficha de campo com parâmetros de perigosidade e vulnerabilidade que recebem pontuação de 3, 9, 27, 81 pontos de acordo com a criticidade de cada parâmetro. Para taludes de solo, a presente pesquisa se propõe a desenvolver a ficha de campo buscando

coerência, na medida do possível, com o que já foi desenvolvido para taludes rochosos no Porto.

Neste artigo apresenta-se uma proposta de análise qualitativa de risco, com terminologia coerente com as recomendações da ISO 31000 (2018), quais sejam: ameaça - fenômeno que pode causar danos; suscetibilidade - propensão para uma área ser afetada por um determinado perigo, em tempo indeterminado; perigo ou perigosidade - probabilidade de que uma ameaça ou evento ocorra dentro de um determinado período de tempo; exposição - as circunstâncias de exposição a um perigo; vulnerabilidade - o grau de perda de um determinado elemento ou conjunto de elementos afetados por um perigo; consequências - representa perda ou dano potencial dos elementos expostos a partir de análises da exposição, vulnerabilidade e valor dos elementos expostos; e risco - medida da probabilidade e gravidade de um efeito na vida, saúde, propriedade ou meio ambiente. Aplicações destes conceitos relativos a riscos podem ser vistos em Nogueira (2002); Viana da Fonseca et al. (2018) e Lai et al. (2019). O risco, portanto, pode ser ilustrado pela relação Perigosidade (P) *versus* Consequências (C). Ressalta-se que não será calculado o valor monetário das consequências, a qual terá medida qualitativa, assim como a vulnerabilidade e a perigosidade.

### **Síntese fisiográfica e geológico-geotécnica do Porto**

O município do Porto faz parte do distrito do Porto na região norte de Portugal e representa uma área de importância econômica e turística. É margeado ao sul pelo Rio Douro, que nasce em serras espanholas e tem a sua foz entre Vila Nova de Gaia e Porto. A passagem do rio pela cidade e o contexto geológico histórico esculpiram escarpas predominantemente de granito na parte central e histórica de maior altitude; e em menor proporção observam-se áreas com rochas metamórficas representadas pelos xistos grauváquicos na porção oriental do município, e gnaisses e xistos na porção ocidental e litorânea, dentre outras formações. Taludes em solo são mais facilmente observados nas áreas de rochas metamórficas. Boa parte da área de recarga em planalto e planície intermediária encontra-se hoje urbanizada, e com parte de seus canais fluviais sotopostos. Portanto, surgências nas escarpas de granito nas margens do Douro podem ser observadas, provenientes de canais fluviais e percolações subsuperficiais já modificadas pelas fundações das construções, cortes e aterros realizados no processo de urbanização.

A percolação pelas discontinuidades, conjuntamente com o sistema de fraturas das rochas graníticas e inclinação elevada, condicionam os taludes às quedas de blocos e escorregamentos, sendo que em boa parte dos locais, o risco foi mitigado por obras de estabilização, como observado em áreas mais centrais da cidade, em taludes de granito. Próximo à região da Ponte Arrábida e Via Panorâmica observa-se, além da possibilidade de quedas de blocos, depósitos superficiais sobre os granitos, que associados à declividade e ocorrência de caminhos naturais de drenagem pluvial condicionam o local a movimentos de massa do tipo escorregamento planar ou corrida de detritos. Na parte oriental, nos vales do Rio Tinto e Rio Torto, afluentes de maior

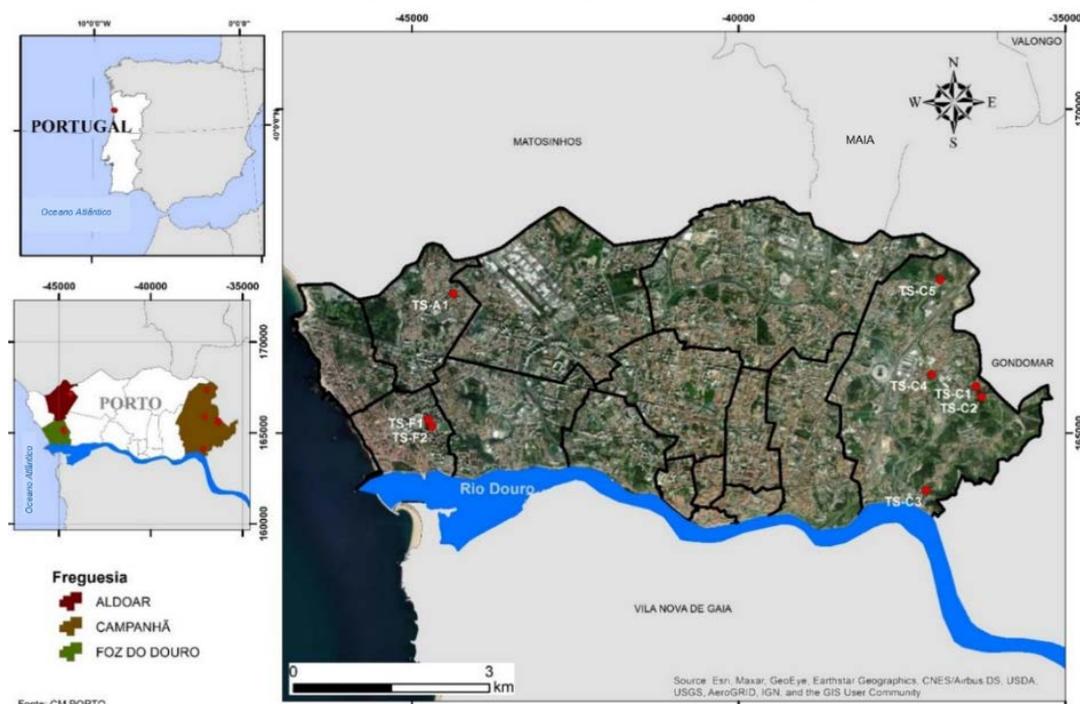
aporte para o Douro, observam-se vertentes urbanizadas e com inclinações e exposição das faces dos taludes que por vezes podem condicionar os taludes de xisto grauváquico ou de solo a escorregamentos planares, principalmente quando descontinuidades das rochas ou estruturas reliquias em solo possuem direção e mergulho desfavoráveis. Processos erosivos nos depósitos aluvionares nas margens do Rio Tinto eventualmente são observados, principalmente quando sujeitos a ação antrópica de cortes e aterros. Para estabelecer esse contexto dos riscos no Porto foi realizado o reconhecimento de campo e consulta a referências bibliográficas, tais como a Carta Geotécnica do Porto (CGP) (Porto, 2003), o Plano Diretor Municipal (Porto, 2018, 2020, 2021), e Borges (2017).

## METODOLOGIA

### Análise de suscetibilidade e definição dos taludes avaliados

A suscetibilidade de escorregamentos de solo foi avaliada anteriormente à escolha dos taludes. Somente após verificada a propensão de ocorrência de escorregamentos em determinada área ou local, partiu-se para análise da perigosidade e risco. As informações de suscetibilidade e das unidades geotécnicas foram obtidas principalmente na CGP (Porto, 2003) e no Plano Diretor Municipal (Porto, 2018, 2020), bem como no reconhecimento de campo realizado no período de outubro de 2020 a fevereiro de 2021 e informações de ocorrências da Proteção Civil. Os seguintes critérios foram definidos para escolha

dos taludes: i) que estejam em áreas de risco já mapeadas; ii) que estejam em áreas com feições de escorregamentos ou processos erosivos identificados em campo; iii) que possuam declividade superior a 25° e altura > 5 m, pois segundo CPRM (2018) esse é um critério de definição de taludes com risco potencial; iv) que estejam em local de ocorrência registrada ou próximo; v) com interferências identificadas nas cartas temáticas, quer seja por suscetibilidade geotécnica ou outras condicionantes das cartas de caracterização física e de infraestruturas. Os oito taludes escolhidos para a análise de risco atendem a pelo menos um dos critérios elencados, e são apresentados na figura 1.



**Figura 1** - Localização dos taludes avaliados quanto ao risco, no município do Porto, Portugal.

Foram priorizadas as áreas: oriental, devido a presença da unidade geotécnica de xisto grauváquico mapeada em Porto (2003) que por vezes origina solos pouco espessos, areno-pedregulhosos, e com estruturas reliquias que condicionam escorregamentos; bem como a parte ocidental da

cidade, a qual também possui solos originados de xistos e gnaisses, além do próprio granito. Os taludes são denominados TS-C1, TS-C2, TS-C3, TS-C4 e TS-C5, em Campanhã, e TS-F1, TS-F2 e TS-A1, na Foz do Douro e Aldoar. A figura 2 apresenta fotos ilustrativas dos taludes avaliados.

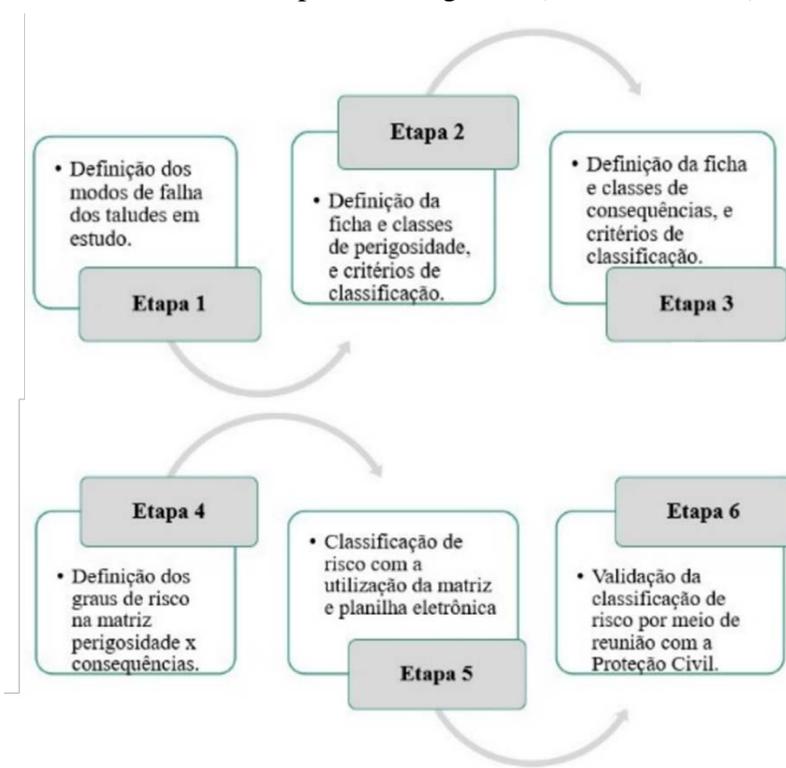


**Figura 2** – Fotos dos taludes avaliados. a) TS-C1; b) TS-C2; c) TS-C3; d) TS-C4; e) TS-C5; f) TS-A1; g) TS-F1; h) TS-F2 (localização indicada na figura 1)

**Etapas propostas para o FMEA e planilha síntese**

A partir da ISO 31010 (2012), as etapas de aplicação do método FMEA foram adaptadas

para utilização em estudos de taludes de solo em áreas urbanas monitoradas pela Proteção Civil, e estão apresentadas no fluxograma da figura 3 (Menezes, 2021).



**Figura 3** - Etapas de aplicação do método FMEA para riscos de escorregamentos em áreas urbanas.

Na etapa 1, foi realizada a análise do histórico de ocorrências e estudo da CGP (Porto, 2003) e demais mapas temáticos (Porto, 2018, 2020) a fim de elencar possíveis mecanismos de ruptura, condicionantes, indícios de instabilidade e possíveis agentes deflagradores de ruptura, confirmados pelos trabalhos de campo, e mais de um cenário de ruptura pode ser avaliado por talude. Já a etapa 2 contemplou a definição da ficha de perigosidade, índices e critérios para definição de classes. Foi adotada uma tabela de pontos que considera 11 parâmetros a serem avaliados por talude.

Após a soma dos pontos de cada índice, enquadra-se o talude em 5 classes de perigosidade. A etapa 3, para definição da ficha e classes de consequências, contempla os mesmos passos da etapa 2, contudo a ficha de consequências possui 5 índices a serem pontuados. A etapa 4 consiste na definição das classes de risco na matriz de perigosidade e consequências, a qual foi adotada com a ordem 5x5. De posse do somatório dos pontos e classes de perigosidade e consequências, aplica-se esse resultado de cada talude na matriz de risco e planilha *FMEA*, que consiste da etapa 5. Já na etapa 6, o resultado da classificação dos riscos dos taludes é discutido em reunião técnica, bem como as ações preventivas, mitigatórias e corretivas.

### **Desenvolvimento da Ficha de Perigosidade**

Além dos indícios de instabilidade (trincas, surgências, movimentação de árvores e estreitamentos, degraus de abatimento), são consideradas as condicionantes hidrogeomorfológicas, geológico-geotécnicas e de cobertura vegetal (altura e inclinação do talude, forma do talude e sua condição de concentração de água, cobertura vegetal benéfica); bem como se considerou o histórico de ocorrências. A ficha possui quatro faixas de pontuação: 3, 9, 27 e 81 pontos, a serem escolhidas para cada parâmetro de perigosidade e consequências. As referências principais foram Borges (2017), que adota o método *RHRS – Rockfall Hazard Rating System*, para análise de perigosidade e vulnerabilidade de taludes rochosos em Porto, a partir da proposta original de Pierson et al (1990) para taludes rochosos rodoviários no Estado de Oregon (EUA); Silva (2016), que propôs uma tabela de perigo para taludes rochosos na região de Ouro Preto, MG, Brasil; e Budetta (2004), que adaptou o *RHRS* para taludes rodoviários no sul da Itália. Especificamente para taludes de solo, Pratt & Santi (2014) apresentam um sistema de avaliação de perigo e riscos de escorregamentos de taludes rodoviários de solo para as auto-

estradas do Colorado (*CLHRS – Colorado Landslides Hazard Rating System*), o qual foi desenvolvido em complemento ao sistema de análise de queda de blocos rochosos usados pelo CDOT – *Colorado Department of Transportation*. O *CLHRS* considera parâmetros relacionados à perigosidade e às consequências. Para fatores de perigosidade cita-se geologia, cobertura vegetal, aspecto de orientação de vertentes, influência da água de superfície, frequência de descontinuidades e inclinação do talude.

Para análise das consequências, os seguintes fatores são considerados: profundidade do plano deslizante, comprimento da rodovia afetada, tráfego médio diário, opções de desvio, tempo de desvio do pior cenário e custo anual de manutenção. Por meio de uma tabela de pontos com faixas de 3, 9, 27 e 81, e multiplicação dos pontos de perigosidade e consequências, os autores chegam a uma pontuação dos parâmetros que é enquadrada em 5 classes de risco. A partir dessas referências, bem como conceitos de CPRM (2018) apresenta-se na figura 4 a ficha de perigosidade proposta para escorregamentos planares, circulares e rastejo.

A determinação dos valores para pontuação 3, 9, 27 ou 81 dos índices de perigosidade foram validados por análises de estabilidade, e/ou por referências bibliográficas, e também por análise crítica qualitativa dos resultados das análises de risco dos taludes após a utilização da ficha.

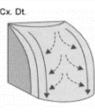
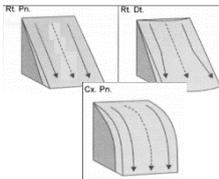
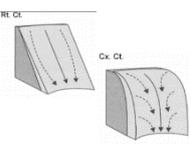
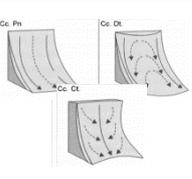
### **Altura do talude**

Para verificar se as alturas de 5, 10, 15, 20 m estão coerentes com as pontuações de 3, 9, 27 e 81 respectivamente, foram atribuídas faixas de FS (Fatores de Segurança) do talude para cada pontuação, de acordo com o nível de segurança requerido, conforme apresenta-se na tabela 1.

A definição de faixas admissíveis de FS de acordo com a condição do talude e respectiva pontuação, foi estipulada a partir da análise dos FS preconizados pela ABNT NBR 11682 (2009) e práticas para determinação de condições de segurança em barragens como estabelecido em DNPM (2017).

Os resultados dos fatores de segurança obtidos nas análises de sensibilidade de um talude hipotético de material de aterro estão apresentados na tabela 2.

Somente para a altura de 20 m não se obteve FS < 1,1, o qual corresponderia à condição de emergência com pontuação máxima (81 pontos). Contudo, como o FS encontrado foi maior (1,26),

Perigosidade		3 pontos	9 pontos	27 pontos	81 pontos
Condicionantes fisiográficas e geológico-geotécnicas	Altura do talude ( $I_{AL}$ )	$I_{AL} \leq 5$ m	$5 \text{ m} < I_{AL} \leq 10$ m	$10 \text{ m} < I_{AL} \leq 15$ m	$I_{AL} > 15$ m
	Inclinação do talude ( $I_{IN}$ )	$I_{IN} \leq 25^\circ$	$25^\circ < I_{IN} \leq 30^\circ$	$30^\circ < I_{IN} \leq 35^\circ$	$I_{IN} > 35^\circ$
	Condições para acúmulo de água superficial, considerando o índice pluviométrico médio para o mês mais chuvoso do ano ( $I_{AG}$ ) <sup>(1)</sup>				
	Cobertura superficial benéfica ( $I_{VG}$ )	Existente área >75% e/ou presença marcante de árvores com raízes profundas	Existente 50% < área < 75% e/ou alguma presença de árvores com raízes profundas	Existente 25% < área < 50% e/ou pouca presença de árvores com raízes profundas	Não existente ou existente c/ área < 25%. Inexistência de árvores com raízes profundas e/ou presença de plantas que acumulam água em suas raízes.
	Condições estruturais relativas às discontinuidades ou estruturas reliquias; e/ou suscetibilidade a processos erosivos ( $I_{DE}$ )	Sem discontinuidades visíveis e/ou conhecidas, e/ou processos erosivos	Uma ou mais discontinuidades com orientação favorável à segurança; e/ou processos erosivos de pequena magnitude (sulcos e/ou erosão laminar)	Uma ou mais discontinuidades com orientação desfavorável à segurança; e/ou processos erosivos de média magnitude (sulcos e ravinas)	Uma ou mais discontinuidades, e/ou erosões de grande magnitude (voçorocas) ou acentuadas. Com orientação desfavorável, saindo na face do talude e possibilidade de escorregamento planar e/ou cunha
Indícios de instabilidade	Trincas no terreno ( $I_{TR}$ )	Ausentes	Presentes, mas superficiais	Presentes, concentradas na crista, com profundidade até 10 cm, sem preenchimento por água	Marcantes, concentradas na crista, com profundidade maior que 10 cm, preenchidas ou não com água.
	Grau de saturação/surgência de água/vazamentos e lançamentos de água/esgoto ( $I_{ST}$ )	Talude seco, sem surgências ou lançamentos/vazamentos	Ligeiramente úmido, sem surgências ou lançamentos/vazamentos	Úmido, com surgências e/ou lançamentos/vazamentos de pequena magnitude	Presença de surgências ou lançamentos/vazamento de água/esgoto significativos
	Árvores inclinadas (se rastejo e escorregamento planar); estreitamento de margem de rios ou vias e/ou aumento de volume na base (se escorregamento circular) - ( $I_{MV}$ )	Ausente	Presente, mas escasso ou suave	Presente	Marcante
	Degrau de abatimento ( $I_{DG}$ )	Ausente	Presente, mas suave	Presente	Marcante
	Cicatriz de deslizamento ( $I_{CD}$ )	Ausente	Presente, mas pequenas magnitudes	Presente	Marcante
Possibilidade de ocorrência de evento danoso	Histórico de ocorrências de movimentos de massa ( $I_{HO}$ )	Sem histórico ou desconhecido	1 a 2 ocorrências de movimentos nos últimos 5 anos	1 ocorrência observada anualmente	Múltiplas ocorrências ao longo do ano
<b>Total de perigosidade:</b>	Baixa (1): 22 a 162 pontos	Média-baixa (2): 163 a 243	Média (3): 244 a 405	Média-alta (4): 406 a 648	Elevada (5): 649 a 891

Notas: (1) desenhos de Huggert (1975) segundo Robaina et al. (2016).

**Figura 4** - Ficha de campo para determinação da perigosidade de escorregamentos de solo.

**Tabela 1** - Critérios para pontuação dos índices altura e inclinação.

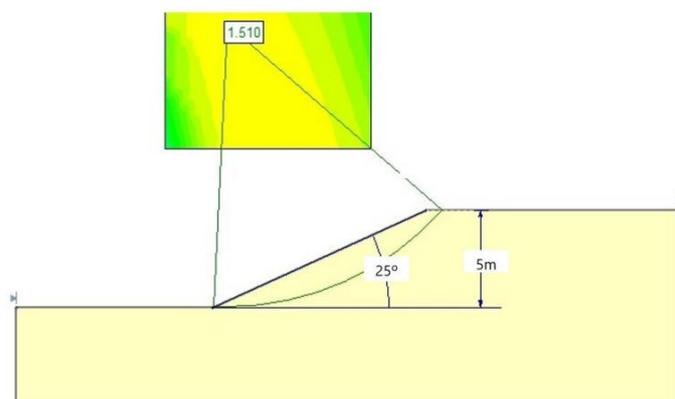
Faixas admissíveis de FS	Condição em relação à segurança	Pontuação atribuída
$FS \geq 1,5$	Normal	3
$1,3 \leq FS < 1,5$	Atenção	9
$1,1 \leq FS < 1,3$	Alerta	27
$FS < 1,1$	Emergência	81

**Tabela 2** - Validação das pontuações correspondentes por altura do talude.

Altura (m)	FS obtido	FS atribuído	Validação
5	1,51	$FS \geq 1,5$	$1,52 > 1,5$ ok!
10	1,36	$1,3 \leq FS < 1,5$	$1,36 > 1,3$ ok!
15	1,30	$1,1 \leq FS < 1,3$	$1,29 < 1,30$ ok!
20	1,26	$FS < 1,1$	$1,26 > 1,1$ não ok!

mantve-se a relação de 81 pontos para altura de 20 m, a favor da segurança. Foram adotados parâmetros da unidade geotécnica de aterros, por possuir menores valores de coesão e ângulo de atrito dentre as demais unidades do Porto, quais sejam: peso específico total 18 kN/m<sup>3</sup>; coesão 2 kPa, adotada para evitar o efeito de círculos de ruptura muito superficiais e irreais, mas que pela CGP seria zero; ângulo de atrito de 28°; sem nível freático, pois conforme a CGP esse nível costuma estar associado com a base do aterro; condição drenada, parâmetros efetivos. Apresenta-se na figura 5 uma das análises de

estabilidade realizadas para verificação dos FS variando com a altura, especificamente a que considera o talude com 5 m de altura e inclinação de 25° (mantida constante nas verificações de FS com variação da altura). Foi utilizado o programa Slide 6.0 da Rocscience, método de Bishop Simplificado. O fator de segurança obtido nesse caso foi de 1,51, o que está coerente com a condição normal de segurança ( $FS \geq 1,5$  conforme tabela 1), e corresponde a 3 pontos. Portanto, após validação por meio de análises de estabilidade, mantiveram-se as classes de altura e respectivas pontuações conforme figura 4.



**Figura 5** - Análise de estabilidade de talude hipotético, altura 5m, inclinação 25°, sem nível de água, condições drenadas.

### ***Inclinação do talude***

Inicialmente as classes de inclinação dos taludes de solo foram 25°; 30°; 40° e 50°. Valores determinados a partir de observação de taludes em campo, pelas informações da CGP (Porto, 2003) sobre inclinações frequentes no município, além de sugestões de referências bibliográficas. Segundo CPRM (2018), a análise de dados japoneses e de experiências em municípios brasileiros, indicam que encostas com inclinação superior a 25° e altura maior ou igual a 5 m já se enquadram na condição onde recomenda-se delimitar e verificar o perigo e risco potencial para movimentos de massa do tipo escorregamento planar, dentre outros critérios. Já a inclinação do talude de 50°, o que seria correspondente ao patamar de maior pontuação quanto à inclinação (81 pontos), está coerente com o mergulho de discontinuidades observadas em Porto (2003), principalmente nas unidades geotécnicas de formações metamórficas como os xistos grauváquicos, as quais associadas a taludes

com face orientada para leste condicionam escorregamentos planares ou cunha, quando a inclinação do talude é maior que o mergulho da descontinuidade.

A validação preliminar desses valores de inclinação foi realizada por meio de análises de estabilidade para um talude hipotético da unidade geotécnica de aterros, com parâmetros já apresentados. Fixando a altura em 5m, e variando a inclinação do talude em 25°, 30°, 40° e 50°, similar ao método de verificação para o parâmetro altura, os fatores de segurança encontrados inicialmente foram 1,51; 1,27; 1,02 e 0,80.

Para a inclinação de 40° e 50° os valores ficaram aquém dos intervalos especificados na tabela 1. Portanto, optou-se por alterar as classes de inclinações para 25°, 30°, 35° e 40°, para atribuir respectivamente 3, 9, 27 e 81 pontos conforme figura 4. Os novos fatores de segurança encontrados e a validação das classes estão apresentados na tabela 3.

**Tabela 3** - Validação das pontuações correspondentes por inclinação do talude.

Inclinação do talude (graus)	FS obtido	FS atribuído	Validação
25	1,51	$FS \geq 1,5$	$1,51 > 1,5$ ok!
30	1,27	$1,3 \leq FS < 1,5$	$1,27 \geq 1,3$ ok!
35	1,15	$1,1 \leq FS < 1,3$	$1,1 \leq 1,15 < 1,30$ ok!
40	1,02	$FS < 1,1$	$1,02 < 1,15$ ok!

### ***Acúmulo de água superficial no talude***

A forma das encostas e taludes interferem na condição de acumulação ou espraiamento da água superficial. Hugget (1975) estabelece nove combinações de forma de vertentes relacionadas às curvaturas vistas em perfil e em planta. As encostas com curvaturas verticais côncavas tendem a ser mais críticas quanto à acumulação de água superficial, portanto foram relacionadas com a pontuação máxima na tabela de perigosidade (81 pontos). Já para a encosta convexa no perfil vertical e contorno horizontal foi atribuída a pontuação mínima (3 pontos). Para as encostas com perfil vertical planar ou convexo e contorno horizontal da mesma forma, foi atribuído 9 pontos. E por fim, para encostas com perfil vertical planar ou côncavo e contorno horizontal côncavo, foi atribuído 27 pontos, conforme figura 4.

### ***Cobertura superficial benéfica***

Embora a influência da vegetação para a estabilidade de taludes ainda não seja considerada de forma generalizada nas análises, inúmeras pesquisas apresentam resultados favoráveis no FS do talude devido à vegetação (Li et al., 2021; Wu et al., 2015; Fiori & Carmingnani, 2009). Li et al. (2021) construíram um modelo de avaliação da vegetação no FS com variação no tempo (considerando o crescimento da vegetação), e obtiveram resultados dos acréscimos na segurança para seis padrões de *layouts* de vegetação com diferentes combinações, além de uma encosta sem vegetação para comparação. Nesse estudo, os autores apresentam que o FS das encostas com vegetação aumentou de 12,1% para 49,6% em relação à encosta sem vegetação; sendo que ao considerar a força do vento na copa das árvores o ganho não foi tão elevado, pois o FS passou de 3,5% para 43,5%, mesmo assim com benefícios ainda significativos. As misturas de vegetação de árvores e gramíneas resultaram na melhor estabilidade de encostas. Portanto, adotou-se nesta pesquisa para as classes de pontuação quanto à vegetação uma combinação de área coberta por gramíneas ou pequenos arbustos conforme Pratt & Santi (2014), e árvores robustas devido ao seu benefício caso suas raízes ultrapassem a superfície de ruptura provável. Na ocorrência de dúvida ou impossibilidade de verificação em

campo se a contribuição das raízes das árvores é favorável ou desfavorável à segurança, adota-se somente a análise da cobertura vegetal superficial.

### ***Crítérios para pontuação quanto às descontinuidades e processos erosivos***

As descontinuidades são condicionantes importantes para os solos residuais graníticos do Porto, mas principalmente para solos residuais metamórficos. Para as unidades geotécnicas relativas a maciço rochoso, as descontinuidades são relevantes, contudo, estes taludes não são avaliados nesta pesquisa. Os taludes das unidades de formações sedimentares possivelmente recebem nota 3 neste quesito, por não possuírem estruturas reliquias, a não ser que apresentem processos erosivos. Inclusive, foi acrescentado o critério de erosões em sulcos, ravinas e voçorocas para que a ficha possa ser utilizada também em solos residuais de gnaisses ou outras formações que são mais homogêneas e com comportamento geotécnico menos influenciado pelas estruturas reliquias. A classificação de 9 pontos foi definida para o talude que apresentar uma ou mais descontinuidades favoráveis à segurança, ou seja, com mergulho para dentro do talude. Já a pontuação de 27 pontos foi adotada para descontinuidades com mergulho em direção à face, independente do ângulo. Este critério foi adotado pois mesmo descontinuidades no sentido da face do talude, porém, sem interceptar a mesma por ter ângulo de mergulho maior que a inclinação da face, favorecem a percolação preferencial de água no plano da descontinuidade e podem condicionar escorregamentos plano circulares ou poligonais. A pontuação de 81 pontos será para descontinuidades com mergulho inferior à inclinação da face do talude, ou mais descontinuidades que condicionem escorregamentos planares e/ou cunha.

### ***Trincas no terreno***

As trincas representam um importante indício de instabilidade de taludes, pois, indicam que a movimentação do terreno está a ocorrer e geralmente a direção do movimento é perpendicular à direção das trincas. CPRM (2018) apresenta a classificação de perigosidade em relação ao parâmetro trincas com 3 graus de criticidade: ausente, presente e marcante. Para esta pesquisa foi adotado

o critério desse autor, contudo adaptado para os 4 graus de criticidade propostos no Figura 4, bem como o acréscimo da condição de fenda de tração preenchida ou não com água, por ser esse fator representativo para o FS do talude.

#### ***Critérios para pontuação das surgências***

Conforme Fiori & Carmingnani (2009), os escorregamentos podem ocorrer por aumento do grau de saturação do solo e consequente perda de coesão aparente; desenvolvimento de pressão neutra, o que diminui a tensão efetiva; aumento do peso total do solo pelo acréscimo de saturação; desenvolvimento de pressões hidrostáticas sobre a massa do solo ou rocha pelo acúmulo de água em fendas ou trincas; aumento da percolação por causa do fluxo subsuperficial, entre outros efeitos. CPRM (2018) define este índice de instabilidade, grau de Saturação/Surgência, como determinado grau de umidade constante da encosta, inclusive em períodos secos (baixa pluviosidade), e o classifica desde ausente, presente e um terceiro grau de criticidade como marcante, com quantidades consideráveis de água minando da encosta. A partir desses conceitos definiram-se os critérios de classificação das surgências conforme apresentado na figura 4.

#### ***Árvores inclinadas, estreitamento de margens de vias/rios ou aumento de volume na base***

CPRM (2018) definiu como índice de instabilidade para escorregamento planar e rastejo, árvores inclinadas em 3 graus de criticidade: ausente, presente e marcante; bem como definiu como índice de escorregamento rotacional, deformações no sopé da encosta ou estreitamento de margens de rios e aumento do volume na base, em 2 graus de criticidade: presente ou marcante. A partir desse conceito, foram definidas 4 classes de perigosidade para este parâmetro: ausente (3 pontos); presente, mas escasso ou suave (9 pontos); presente (27 pontos); e marcante (81 pontos), conforme figura 4.

#### ***Degrau de abatimento***

CPRM (2018) define degrau de abatimento como uma fenda em estágio avançado, com deslocamento vertical, para baixo, de um nível do terreno em relação ao outro, e classificou este parâmetro como ausente, presente ou marcante para fins de análise da perigosidade em escorregamentos rotacionais. Estes critérios foram adaptados conforme figura 4.

#### ***Cicatrices de deslizamento***

A CPRM (2018) define cicatrizes de deslizamentos como movimentos de massa anteriores que deixam marcas (cicatrices) na encosta, na

forma de áreas sem vegetação com solo ou rocha exposta. No sopé da encosta pode haver também acúmulo de solo junto de vegetação soterrada. Esse autor utilizou a cicatriz de deslizamento somente para escorregamentos planares, e dividiu nas classes: ausente, presente e marcante. Esses critérios foram adaptados e se utilizou as cicatrizes tanto para escorregamentos planares ou rotacionais, com as classes: ausente (3 pontos); presente, mas com pequenas magnitudes (9 pontos); presente em mais de um ponto na encosta (27 pontos); marcante (81 pontos).

#### ***Histórico de ocorrências ou previsão de movimentos de massa***

Foram adotados os critérios de classificação de Pratt & Santi (2014) quanto às classes de perigosidade para ocorrências de movimentos de massa, os quais são: para o desconhecimento de ocorrências de movimentos de massa ou sem ocorrências, se atribui 3 pontos; para de 1 a 2 ocorrências nos últimos 5 anos, 9 pontos; para 1 ocorrência observada anualmente, se atribui 27 pontos; e para múltiplas ocorrências durante o ano, atribui-se 81 pontos, conforme apresentado na figura 4.

#### ***Definição das classes de perigosidade***

As seguintes etapas foram seguidas para definir os critérios de pontuação de perigosidade para taludes em solo, de forma a possibilitar a aplicação do resultado de pontos da tabela de perigosidade na matriz de risco: i) estudo e consideração dos critérios qualitativos para classificação de perigosidade apresentados em ANPC (2009); ii) estudo e consideração de parâmetros de perigosidade e escala de pontuação conforme considerações de Borges (2017); Pratt & Santi (2014); CPRM (2018) e Campos (2011); iii) Validação dos critérios de divisão dos intervalos de classes de perigosidade por meio de simulações de combinações de pontos e reunião técnica, e/ou avaliação de FS dos taludes. Os intervalos de classes de perigosidade e critérios estão apresentados na tabela 4.

#### ***Desenvolvimento da Ficha de Consequências***

Para consequências, procurou-se reunir parâmetros de exposição (ocupação do talude, relação entre afastamento da moradia à base do talude/altura do talude); parâmetros de vulnerabilidade das edificações (condições das moradias ou estruturas como vias, estabelecimentos comerciais, turísticos e largura da plataforma para contenção do escorregamento antes que atinja a moradia ou estrutura); e condicionantes do contexto urbanístico (como áreas turísticas, de interesse ambiental,

**Tabela 4** - Critérios para divisão de classes de perigosidade.

Classes de Perigosidade (ANPC, 2009)	Critérios para classificação (ANPC, 2009)	Intervalos de classes (1)	Detalhamento dos critérios adotados nesta pesquisa para a definição dos intervalos de classes (2)
<b>Baixa (1)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poderá ocorrer apenas em circunstâncias excepcionais.</li> <li>- Pode ocorrer uma vez em cada 500 anos ou mais (&lt; 0,2% chance de ocorrência em um ano qualquer).</li> </ul>	33 a 162	<p>O limite de 162 pontos (6x27) foi definido a partir das seguintes situações limítrofes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>i) 4 parâmetros de 27 pontos + 5 parâmetros de 9 pontos + 3 parâmetros de 3 pontos (total 162 pontos);</li> <li>ii) 1 parâmetro de 81 pontos + 2 parâmetros de 27 pontos + 8 parâmetros de 3 pontos (total 159 pontos);</li> <li>iii) 5 parâmetros com 27 pontos + 1 parâmetro com 9 pontos + 5 parâmetros com 3 pontos (total 159 pontos);</li> <li>iv) Qualquer outra combinação, com no máximo 1 parâmetro de 81 pontos e 5 parâmetros de 27 pontos.</li> </ul>
<b>Média-baixa (2)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não é provável que ocorra.</li> <li>- Não há registros ou razões que levem a estimar que ocorram.</li> <li>- Pode ocorrer uma vez em cada 100 anos (&lt;=1% de chance de ocorrência em um ano qualquer).</li> </ul>	163 a 243	<p>O limite de 243 pontos (9x27) foi definido a partir das seguintes situações limítrofes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>i) 2 parâmetros de 81 pontos + 2 parâmetros de 27 pontos + 1 parâmetro de 9 pontos + 6 parâmetros de 3 pontos (total 243 pontos);</li> <li>ii) 8 parâmetros de 27 pontos + 3 parâmetros de 9 pontos (total 243 pontos);</li> <li>iii) Qualquer outra combinação, com no máximo 2 parâmetros de 81 pontos e 8 parâmetros de 27 pontos.</li> </ul>
<b>Média (3)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poderá ocorrer em algum momento.</li> <li>- E ou com uma periodicidade incerta, aleatória, e com fracas razões para ocorrer.</li> <li>- Pode ocorrer uma vez a cada 20 anos.</li> <li>- Pode ocorrer em períodos entre 20 a 50 anos (de 2% a 5% de chance de ocorrência em um ano qualquer).</li> </ul>	244 a 405	<p>O limite de 405 pontos (15x27) foi definido a partir das seguintes situações limítrofes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>i) 4 parâmetros de 81 pontos + 2 parâmetros de 27 pontos + 2 parâmetros de 9 pontos + 3 parâmetros de 3 pontos (total de 405 pontos);</li> <li>ii) Outras combinações sendo com máximo 4 parâmetros de 81 e 11 parâmetros de 27 pontos.</li> </ul>
<b>Média-alta (4)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Irá provavelmente ocorrer em quase todas as circunstâncias.</li> <li>- E ou registros regulares de incidentes e razões fortes para ocorrer.</li> <li>- Pode ocorrer uma vez em cada cinco anos.</li> <li>- Pode ocorrer uma vez em períodos de 5 a 10 anos (de 10% a 20% de chance de ocorrência em um ano qualquer).</li> </ul>	406 a 648	<p>O limite de 645 pontos (arredondado para 648 (24x27) foi definido a partir das seguintes situações limítrofes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>i) 7 parâmetros com 81 pontos + 2 parâmetros com 27 + 2 parâmetros com 9 pontos + 2 parâmetros com 3 pontos;</li> <li>ii) Outras combinações com máximo 7 parâmetros de 81 e 11 parâmetros de 27 pontos.</li> </ul>
<b>Elevada (5)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- É expectável que ocorra em quase todas as circunstâncias.</li> <li>- E ou nível elevado de incidentes registrados.</li> <li>- E ou fortes evidências. E ou forte probabilidade de ocorrência do evento.</li> <li>- E ou fortes razões de ocorrer.</li> <li>- Pode ocorrer uma vez por ano ou mais (próximo de 100% de chance de ocorrência em um ano qualquer).</li> </ul>	649 a 891	<p>Qualquer combinação de pontos superior a 649 e até 891 (11x81).</p>

Nota (1): Divisão de classes mantendo o padrão de Borges, 2017, com 11 parâmetros de análise de perigosidade. Portanto, a pontuação mínima é 33 (11 x 3 pontos), a pontuação máxima é 891 (11 x 81 pontos), e limites de classes sempre múltiplos de 27. Contudo, as pontuações limítrofes dos intervalos foram verificadas de forma a atender os critérios de classes de perigosidade de ANPC, 2009, bem como adaptar a metodologia para taludes de solo. Nota (2): Para verificar os limites dos intervalos foram testadas várias combinações na matriz de perigosidade de ordem 4 x 11.

social ou arqueológico). Cada parâmetro recebeu uma nota de 3, 9, 27 ou 81 pontos de acordo com seus graus de ocorrência ou relevância, sendo quanto maior a pontuação, maior criticidade. E para cada parâmetro buscou-se a validação em referências, ocorrências, e análise técnica qualitativa após o resultado da avaliação do risco com a tabela de consequências, apresentada na figura 6.

### **Ocupação do talude**

Foram adotados os critérios de classificação de Borges (2017) quanto às pontuações para a ocupação do talude. Este parâmetro relaciona-se com os elementos expostos, sendo atribuídos 3 pontos para ocupação nula; 9 pontos para agrícola; 27 pontos para logradouros; 81 pontos para áreas habitacionais ou de equipamentos coletivos. A

carta de Qualificação do Solo apresentada no PDM (Porto, 2020) foi consultada além da observação deste quesito em campo.

### **Afastamento da moradia**

Foram adotados os critérios de classificação de Campos (2011), obtido a partir de experiência em áreas de risco de Belo Horizonte, onde a relação entre o afastamento da moradia (construção, estrutura ou via) em relação à altura do talude oferece indícios da exposição deste elemento ao movimento de massa. Este parâmetro se relaciona à probabilidade do material escorregado atingir pessoas ou estruturas.

### **Condições da moradia**

A CPRM (2018) emprega quatro classes de vulnerabilidade segundo as condições das moradias,

Consequências		3 pontos	9 pontos	27 pontos	81 pontos
Exposição do elemento	Ocupação do Talude	Nula	Agrícola	Logradouro	Habitacional ou equipamento coletivo
	Afastamento da moradia/estrutura à base do talude/altura do talude	$A/H \geq 2/1$	$2/1 > A/H \geq 1/1$	$1/1 > A/H \geq 1/3$	$A/H \leq 1/3$
Vulnerabilidade das construções e capacidade de se antever ao escorregamento	Condições das moradias, ou estruturas como vias, estabelecimentos comerciais, turísticos, etc.	Visualmente resistentes ao movimento de massa e/ou que tenham um anteparo de proteção que favoreça a destruição mínima ou nula em caso de serem atingidas pelo escorregamento	Visualmente bem construídas, sem danos estruturais, com provável pouca destruição se atingida por movimentos de massa	Com danos estruturais visíveis ou pouco resistentes, com provável significativa destruição se atingida por movimentos de massa	Com danos estruturais marcantes ou baixa resistência, com destruição integral se atingida por movimentos de massa
	Largura da plataforma	$>9$ m	6 a 9 m	3 a 6 m	$< 3$ m
Valor dos elementos expostos e custo de recuperação	Condicionantes do contexto urbanístico	Zonas interdidas ou de ocupação irregular de baixa densidade, e com mais nenhum condicionante urbanístico	Zonas habitacionais e/ou de ocupação irregular de baixa a média densidade, e/ou com até mais 1 condicionante urbanístico	Zonas de atração turística ou habitacional densa, uma vez que o trânsito de pessoas nessa área é bastante superior, e com até mais 2 condicionantes urbanísticos	Zonas de grande trânsito de pessoas, como edifícios públicos, áreas comerciais, etc., e com 3 ou mais condicionantes urbanísticos
Total de consequências:	Residual (1): 15 a 54	Reduzida (2): 55 a 108	Moderada (3): 109 a 189	Acentuada (4): 190 a 297	Crítica (5): 298 a 405

**Figura 6** - Ficha de campo para determinação das consequências.

desde muito alta, que considera edificações precárias associadas a assentamentos não legalizados espalhados pelas várias regiões brasileiras; até baixa vulnerabilidade, que considera as construções que apresentam laudo técnico que assegure a integridade da edificação para determinado tipo de movimento de massa, apesar de estar localizada em áreas de perigo. Inclusive, as condições das moradias são o único parâmetro de vulnerabilidade avaliado por este autor, o qual se justifica pela importância desse fator na análise de risco de áreas críticas no Brasil. Para esta pesquisa adotou-se como ponto de partida CPRM (2018), e se estabeleceu o parâmetro de condições da moradia em quatro classes de pontuação descritas na figura 4, para adequação às condições do Porto.

#### **Largura da plataforma**

A largura da plataforma é onde as pessoas ou veículos circulam, e que condiciona a possibilidade de se desviarem do material escorregado. Foi adotado por Borges (2017), para taludes rochosos do Porto. Optou-se por manter este fator, além do alcance, pois trata-se de um conceito diferente do afastamento da moradia em relação à altura do talude. No item de afastamento, o objetivo é estimar a probabilidade de atingimento de uma construção fixa, e pondera em relação à altura do talude se a moradia será atingida, levando em consideração pesquisas que relatam os alcances médios de escorregamentos de solo. Já a largura da plataforma, expressa a condição de possíveis elementos expostos transitando próximo ao talude no momento do escorregamento, como pessoas e veículos, e a

possibilidade de se desviarem do material rompido. Além de verificar a capacidade de retenção da massa rompida, independente da altura do talude.

#### **Contexto urbanístico**

O parâmetro contexto urbanístico foi adotado por Borges (2017) para taludes rochosos do Porto, e expressa a possibilidade de taludes inseridos em diferentes contextos quanto às condicionantes da ocupação e uso da área. Foram adotadas quatro classes de pontuações: zona interdita; zona habitacional; zona de atração turística; zona com grande afluência de pessoas; acrescentando a ocorrência de um ou mais condicionantes urbanísticos, que podem estar relacionados a domínio hídrico; espécies florestais protegidas, árvores e arvoredo de interesse público; patrimônio edificado, incluindo áreas de patrimônio arqueológico, arquitetônico, natural; estabelecimentos prisionais; de Defesa Nacional; rede elétrica, gasoduto, oleoduto; rede rodoviária, ferroviária e aeroportos; farol, marcos e áreas de servidão de abastecimento de água.

#### **Definição das classes de consequências**

As consequências são avaliadas na figura 6 somente em relação à segurança da população. Contudo, na planilha *FMEA* e no estabelecimento de classes de consequências conforme se apresenta na tabela 5, também são descritos os critérios para avaliar as consequências de um evento danoso para os sistemas meio ambiente e para a socioeconomia, o que está alinhado com ANPC (2009) e UNDRR (2019). A consequência é classificada segundo 5 (cinco) categorias, variando de desprezível a extrema. Os critérios

qualitativos de divisão dos intervalos de classes foram adotados conforme ANPC (2009). Contudo, para as classes reduzida e moderada, quanto ao

impacto no meio ambiente e socioeconomia, foram adotados os critérios de Petronilho (2010) e Espósito & Palmier (2013).

**Tabela 5** - Critérios para divisão de classes de consequências.

Classes de Consequências (ANPC, 2009)	Critérios para classificação (ANPC, 2009)	Intervalos de classes <sup>(1)</sup>	Detalhamento dos critérios adotados nesta pesquisa para a definição dos intervalos de classes <sup>(2)</sup>
Residual (1)	<i>População:</i> Não há feridos nem vítimas mortais. Não há mudança/retirada de pessoas ou apenas de um número restrito, por um período curto (até 12 horas). Pouco ou nenhum pessoal de apoio necessário (não há suporte ao nível monetário nem material). Danos sem significado.	15 a 54	Intervalos apresentados para a proteção Civil, validados por análise da coerência dos resultados, bem como após a utilização desses critérios em Contagem e comparação com o resultado do PMRR, 2017.
	<i>Ambiente:</i> Não há impacto no ambiente, ou é não mensurável.		
	<i>Socioeconomia:</i> Não há ou há um nível reduzido de constrangimentos na comunidade. Não há perda financeira.		
Reduzida (2)	<i>População:</i> Pequeno número de feridos, mas sem vítimas mortais. Algumas hospitalizações e retirada de pessoas por um período inferior a 24 horas. Algum pessoal de apoio e reforço necessário. Alguns danos.	55 a 108	Intervalos apresentados para a proteção Civil, validados por análise da coerência dos resultados, bem como após a utilização desses critérios em Contagem e comparação com o resultado do PMRR, 2017.
	<i>Ambiente:</i> Pequeno impacto no ambiente sem efeitos duradouros.		
	<i>Socioeconomia:</i> Disrupção (inferior a 24 horas). Alguma perda financeira.		
Moderada (3)	<i>População:</i> Tratamento médico necessário, mas sem vítimas mortais. Algumas hospitalizações. Retirada de pessoas por um período de 24 horas. Algum pessoal técnico necessário. Alguns danos.	109 a 189	Intervalos apresentados para a proteção Civil, validados por análise da coerência dos resultados, bem como após a utilização desses critérios em Contagem e comparação com o resultado do PMRR, 2017.
	<i>Ambiente:</i> Impacto Significativo e reversível no habitat		
	<i>Socioeconomia:</i> Alguma disrupção (superior a 24 horas). Alguma perda financeira.		
Acentuada (4)	<i>População:</i> Número elevado de feridos e de hospitalizações. Número elevado de retirada de pessoas por um período superior a 24 horas. Vítimas mortais. Recursos externos exigidos para suporte ao pessoal de apoio. Danos significativos que exigem recursos externos.	190 a 297	Intervalos apresentados para a proteção Civil, validados por análise da coerência dos resultados, bem como após a utilização desses critérios e em Contagem e comparação com o resultado do PMRR, 2017.
	<i>Ambiente:</i> Impacto significativo no habitat, grande, porém reversível.		
	<i>Socioeconomia:</i> Funcionamento parcial da comunidade com alguns serviços indisponíveis. Perda significativa e assistência financeira necessária.		
Crítica (5)	<i>População:</i> Grande número de feridos e de hospitalizações. Retirada em grande escala de pessoas por uma duração longa. Significativo número de vítimas mortais. Pessoal de apoio e reforço necessário.	298 a 405	Qualquer combinação de pontos superior a 298 e até 405.
	<i>Ambiente:</i> Impacto ambiental significativo e ou danos permanentes.		
	<i>Socioeconomia:</i> A comunidade deixa de conseguir funcionar sem suporte significativo.		

### Matriz de Risco

A perigosidade e consequências determinam o risco de ruptura do talude, que será apresentado em uma matriz de ordem 5 x 5, perigosidade x consequências. A ordem da matriz e divisão de classes de risco estão conforme ANPC (2009) e Borges (2017).

A matriz bidimensional adotada mostra os graus de risco representados por cores, com nível de risco aumentando no sentido do canto inferior esquerdo para o canto superior direito. As classes de risco estão apresentadas por cores semafóricas, sendo VERDE para risco baixo (R1); AMARELO para risco moderado (R2); LARANJA para risco elevado (R3); VERMELHO

para risco extremo (R4).

O critério de cores difere de ANPC (2009) somente em relação à cor verde, pois essa referência adotou para risco baixo a cor roxa. As fichas de campo desta pesquisa são para a análise de risco para a saúde e segurança da população. Contudo, a partir da recomendação de ANPC (2009) e UNDRR (2019) para se avaliar os riscos para os sistemas meio ambiente e socioeconomia, apresentam-se as análises para estes sistemas, as quais foram feitas na planilha FMEA de forma qualitativa, sem atribuição de pontuação, e seguindo os critérios para definição de classes de perigosidade e consequências apresentados na tabela 4 e tabela 5.

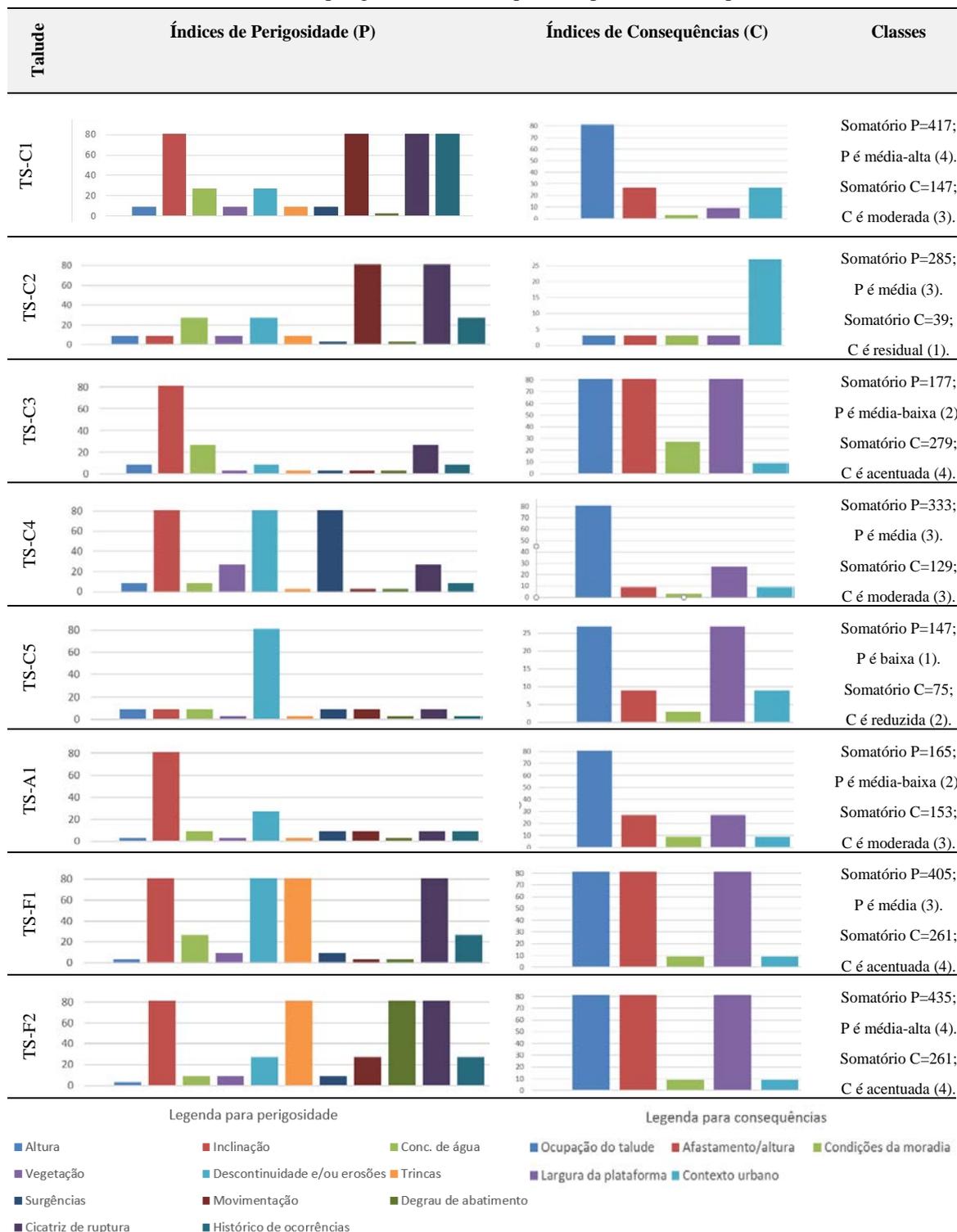
## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Índices de Perigosidade e Consequências Por Talude

A pontuação de cada índice de perigosidade e consequências está apresentada em gráficos na

tabela 6, para cada talude, bem como a indicação do somatório de pontos, a partir do qual é possível definir qual a classe de perigosidade e consequências o talude se encontra.

**Tabela 6** - Gráficos de índices de perigosidade e consequências por talude e enquadramento em classes.



Em termos de somatório de índices de perigosidade, o talude TS-F2 apresenta o maior valor (435 pontos), sendo enquadrado na perigosidade média-alta (4), com 4 índices com a pontuação máxima de 81: inclinação, trincas, cicatriz de ruptura e

degrau de abatimento, resultado que sugere que as ações corretivas são as mais indicadas para estabilizar o talude, principalmente por haver um prédio próximo à crista; seguido do talude TS-C1 (417 pontos) que da mesma forma possui 4 índices

com pontuação de 81: inclinação, sinais de movimentação, cicatriz de ruptura e histórico de ocorrências, o que também sugere ações estruturantes de estabilização na base, por haver uma via próxima à crista (Circunvalação N12). Observa-se que a inclinação recebe nota máxima (81) para 6 dos 8 taludes estudados, não sendo crítica somente para os taludes TS-C2 e TS-C5, nos quais as ações não necessitam ser de estabilização e contenção, mas sim, ações preventivas associadas ao tratamento e controle de processos erosivos.

Em relação aos indícios de instabilidade, os taludes TS-C1, TS-C2, TS-F1 e TS-F2 apresentam maiores pontuações, sendo, portanto, recomendadas ações mitigatórias principalmente em períodos chuvosos, como sinalização, colocação de lona, tamponamento de trincas na crista para evitar preenchimento com água e agravamento da situação de perigosidade. O talude TS-C3 não apresentou pontuação crítica para indícios de instabilidade, contudo, não foi possível ter acesso completo à crista do mesmo, e se recomenda o monitoramento deste local. Já o talude TS-C4 apresentou 3 notas máximas: inclinação, processos erosivos e surgências, e requer um estudo hidrogeológico prévio às análises de estabilidade e projetos de estabilização, pois foi identificado

nos mapas temáticos uma nascente próxima ao talude e curso de água o qual encontra-se atualmente sotoposto.

O talude TS-A1 está com perigosidade média-baixa (2) e se encontra em vias de iniciar obras no local. Na análise de índices de consequências, o talude com maior pontuação (279 pontos), consequência acentuada (4), é o TS-C3, o qual possui 3 índices com pontuação máxima de 81: ocupação da área, relação afastamento/altura do talude e largura da plataforma de retenção. Os taludes TS-F1 e TS-F2 também apresentam pontuações elevadas para consequências (261 pontos), sendo enquadrados na classe acentuada, devido à proximidade dos prédios. Em termos de índices críticos, a zona habitacional foi a mais impactante em 7 dos 8 taludes estudados, seguida da relação afastamento da construção pela altura do talude.

### Matriz de Risco

A figura 7 apresenta os resultados das análises de perigosidade e consequências para cada talude, apresentados em uma matriz de risco, sendo que a figura 7a representa o risco para a saúde e segurança da população, a figura 7b para o meio ambiente, a figura 7c para a socioeconomia, e a figura 7d apresenta as classes de risco de R1 a R4 adotadas, nas quais se enquadram os taludes.

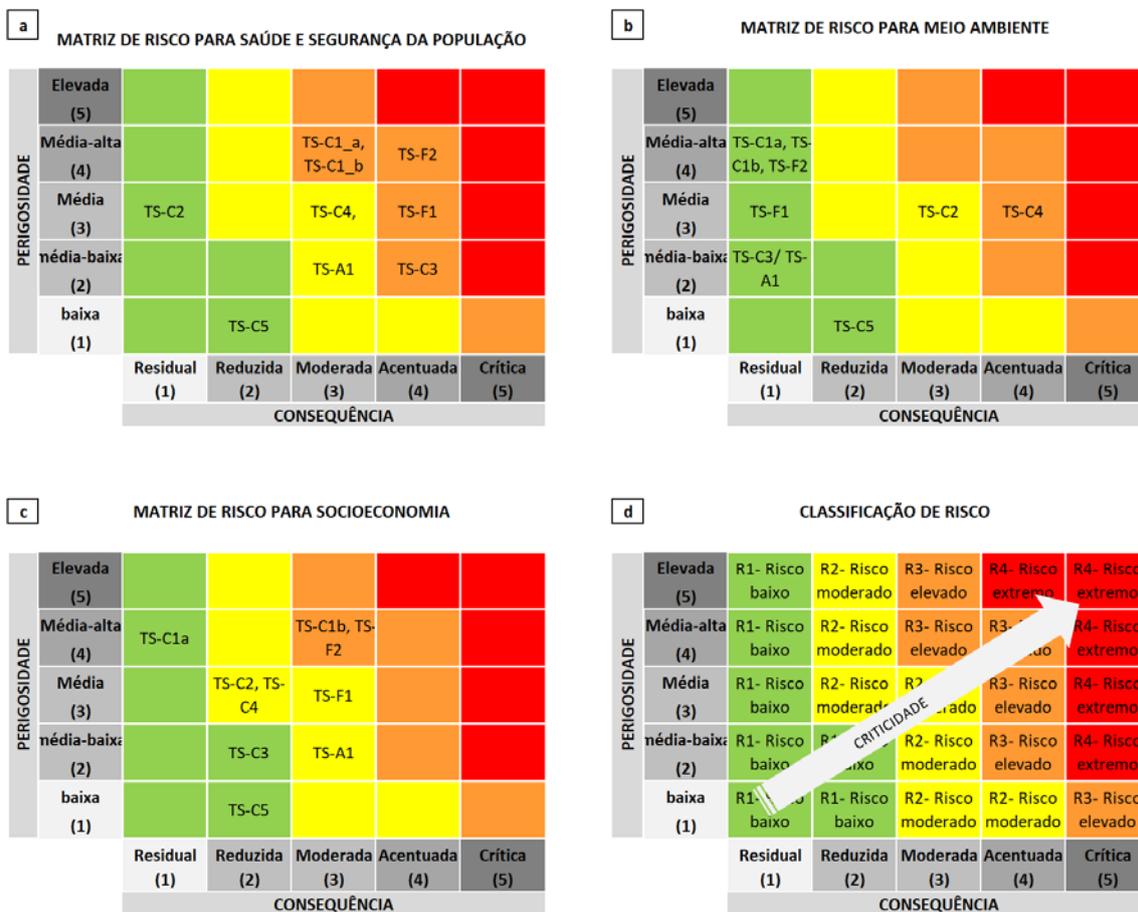


Figura 7 - Matriz de Risco (adaptada de ANPC, 2009 e Borges, 2017).

Em relação à saúde e segurança da população, os taludes mais críticos, com risco R3, são o TS-F2, TS-F1, TS-C3, TS-C1 em ordem de criticidade considerando o critério de desempate a maior classe de consequências. Em seguida, tem-se os taludes TS-A1 e TS-C4 para risco R2. Com risco R1, encontram-se os taludes TS-C2 e TS-C5. Para o TS-C1 foram analisados dois modos de falha, sendo “a” para escorregamentos na base de pequena magnitude, e “b” para escorregamentos de média magnitude. Para o impacto dos riscos ao meio ambiente, somente o talude TS-C4 obteve classificação R3, por estar em região próxima a curso de água atualmente sotoposto. Em seguida, tem-se o TS-C2 com risco R2, devido aos processos erosivos avançados e transporte de sedimentos para o Rio Tinto. Os demais taludes estão classificados com risco R1. A matriz de risco para socioeconomia, associada aos custos de reparação e impactos econômicos caso os modos de falha dos taludes se efetivem, apresenta com risco R3

## CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia *FMEA*, conforme apresentada na ISO 31010 (2012), não requer de modo específico o desenvolvimento das fichas semiquantitativas para perigosidade e consequência, pois aceita a determinação qualitativa destas variáveis para consolidação na planilha e matriz de risco.

Contudo, as fichas que consideram pontuações dos índices de acordo com sua relevância, possibilitam a análise dos riscos dos taludes de forma mais objetiva, a realização dos trabalhos de campo com menores discrepâncias entre avaliadores, bem como torna o método reproduzível com maior facilidade.

A realização de análises de estabilidade para embasar a definição dos índices de altura e inclinação na ficha de perigosidade mostrou-se uma ferramenta importante para a calibração do método para a escala local, o que está em alinhamento com diretrizes internacionais como UNDRR (2019), que preconiza a importância de identificar mecanismos de ruptura típicos, parâmetros geotécnicos respectivos, e utilizar ferramenta computacional de análise de equilíbrio limite para obter fatores de segurança (FS) e sua

relação com o risco de escorregamentos. o TS-C1b, devido à possibilidade de um escorregamento de média magnitude impactar o muro adjacente à via N12 que se encontra próximo à crista desse talude; e o TS-F2, devido à possibilidade de um escorregamento expor a fundação do edifício que se encontra na crista, ou causar algum dano à mesma, com o desconfinamento. Com risco R2, tem-se TS-C2, TS-C4, TS-A1 e TS-F1; e risco R1, encontram-se os taludes TS-C3, TS-C5 e TS-C1a, por haver um nível reduzido de constrangimentos na comunidade, sem perdas financeiras em caso de escorregamentos, ou no máximo alguma perda financeira, com interrupção de algum serviço por até 24 horas.

### Planilha *FMEA*

As informações e resultados obtidos nos trabalhos de campo, no preenchimento das fichas de perigosidade e consequências e na análise dos históricos dos taludes, quando existentes, obtidos junto à Proteção Civil do Porto, estão consolidadas na Planilha *FMEA* apresentada na figura 8.

relação com o risco de escorregamentos.

A visualização dos índices de perigosidade e consequências em forma de gráficos auxilia na identificação de qual índice é crítico para cada talude, colabora na definição de ações preventivas, mitigatórias e corretivas mais adequadas para diminuição desses índices, e permite prever cenários futuros críticos diferenciados, colaborando com o planejamento de ações preventivas no âmbito da Proteção Civil. É o caso do talude TS-C1, onde escorregamentos de menor magnitude que já ocorrem na base, podem desencadear escorregamentos de média magnitude, os quais hipoteticamente podem impactar na via pública, localizada na crista.

Por fim, a aplicação da metodologia *FMEA* para a gestão de riscos de escorregamentos de solo no âmbito da Proteção Civil do Porto se mostrou viável, pois, a consolidação dos dados em forma de planilha ou tabela, bem como a apresentação dos taludes em matriz de risco, facilita a visualização da criticidade e possibilita o debate dos riscos em equipe de forma prática e com discussão dos aspectos de perigosidade e consequências.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por: Financiamento programático - UIDP/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, no escopo do Projeto Carta Geotécnica de risco no Município de Contagem, MG. Pesquisa realizada no âmbito do programa Doutoral em São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 41, n. 3, p. 703 - 719, 2022

Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em parceria com o Departamento de Pós Graduação do Instituto de Geociências da UFMG. Os autores desejam agradecer ao Serviço Municipal de Proteção Civil da Câmara Municipal do Porto, na pessoa do Diretor do Departamento Municipal de Proteção Civil, Dr. Luís Moutinho, toda a colaboração prestada.

Local	Identificação	Modo de falha	Causa	Efeitos	Unidade Geotécnica	Justificativas/ histórico	Perigosidade	Consequências			Ações Mitigadoras (AM) e/ou Controles Mitigatórios (CM) e/ou Ações corretivas (AC)
								Saúde e Segurança	Meio ambiente	Socioeconomia	
Taludes do Parque Oriental adjacente à circunvalação N12	TS-C1_a	Escorregamento planar de pequena magnitude	Inclinação maior de 50 graus e corte na base	Evolução do nível de risco e possível preparação das condições para escorregamento planocircular de maior profundidade	G4X e G5	Foi observada ruptura planar rasa em nov/dez/2020, condicionada pela estrutura reliquiar do xisto, com foliação desfavorável e mergulho próximo de 50°. Além de corte na base (entre 70 a 100cm de altura).	Média-alta - 4	Moderada - 3	Residual - 1	Residual - 1	CM - Evitar cortes na base, monitoramento antes e após período chuvoso. AM - acerto da declividade da crista e direcionamento de água pluvial.
	TS-C1_b	Escorregamento plano-circular de média magnitude	Superfície pretérita de ruptura, inclinação maior que 50° e foliação desfavorável	Instabilização de muro da N12 por desconfinamento da base	G4X e G5	Várias superfícies de rupturas planares de pequena magnitude observadas na base, que podem condicionar rupturas de maior porte e profundidade, instabilizando o muro.	Média-alta - 4	Moderada - 3	Residual - 1	Moderada - 3	AC - Retaludamento com inclinação menor que 45°, construção de muro de pequena altura na base, acerto da declividade da berm superior para possibilitar drenagem e/ou implantar sistema de drenagem.
Talude sob a Ponte IC29/A43 e adjacente ao Rio Tinto, Parque Oriental.	TS-C2	Escorregamento planar de colúvio/alúvio/aterro, associado à processos erosivos	Talude em aterro/alúvio, inconsolidado e com baixa resistência. A retirada da cobertura vegetal para construção da ponte e processos erosivos predisuseram o talude a escorregamentos planares superficiais quando no período chuvoso.	Assoreamento do trecho do Rio Tinto, adjacente ao talude	G2	Talude que apresenta processos erosivos acentuados, e carregamento de solo para o Rio Tinto, conforme observado em campo. O que deve se agravar em período chuvoso.	Média - 3	Residual - 1	Moderada - 3	Reduzida - 2	CM - Visitas de campo em período chuvoso para acompanhamento do volume de material assoreado, bem como do processo de ravinamento e escorregamentos; AM - avaliar colocação de blocos de rocha na base do talude para evitar que um volume maior de material escorra para o rio; AC - projeto de retaludamento do talude e implantação de cobertura vegetal eficaz no controle da erosão.
Talude na Rua do Bacclo com Rua do Freixo.	TS-C3	Escorregamento planar de solo ou saprolito, associado à processos erosivos	Corte verticalizado, processos erosivos, sobrecarga na crista	Danos ou desmoronamento das moradias construídas na crista	G4-X e G5	Foi observado em campo, cicatriz de ruptura pretérita e erosões. A probabilidade está média-baixa 2 pois não foi possível a identificação visual e tátil do talude. As consequências quanto à segurança é acentuada devido a moradias construídas na crista.	Média-baixa - 2	Acentuada - 4	Residual - 1	Reduzida - 2	CM - Abertura de ocorrência e monitoramento; AM - Informar aos moradores dos possíveis riscos, e avaliar a situação dos mesmos; acessar o talude e refazer a avaliação; AC - Verificar junto à câmara se há projeto para o local, já que parte da área que está na base do talude encontra-se em área verde lúdico-produtiva conforme a planta de qualificação do solo.
Akameda De Cartes, próximo a R. São Roque da Lameira.	TS-C4	Movimentos de massa complexos, envolvendo escorregamentos planares de pequena magnitude, corrida de detritos e solo, e queda de blocos	Percolação de água pelo talude, corte com retirada de proteção vegetal, e material rochoso alterado, com descontinuidades preenchidas por solo e água, por vezes. Intercalações com aterro/colúvio.	Danos à veículos e pessoas que transitam pela via. Impactos em área de importância hídrica	Intercalações de G2 e G8	A surgência observada na face do talude estava a causar percolação de água no sentido da via. No período de frio, formou-se uma camada de gelo que gerou deslizamento de carros. Movimentos de massa de pequena magnitude foram observados, com detritos no passeio, os quais foram rapidamente retirados.	Média - 3	Moderada - 3	Acentuada - 4	Reduzida - 2	CM - Visitas de campo em período chuvoso para acompanhamento de possíveis escorregamentos, bem como das surgências; AM - Implantação de drenagem superficial para direcionamento da água das surgências e água pluvial; AC - Escorregamentos associados com as surgências. Sugere-se o desenvolvimento de projeto, embasado por investigações geotécnicas
Talude R. Virginia Moura	TS-C5	Corrida de detritos e escorregamentos de pequena magnitude.	Falta de sistema formal de drenagem, com formação de caminhos preferenciais de água potencializando a corrida de material inconsolidado (aterro)	Impedimento e/ou transtornos no trânsito local.	G1, G4-G e G8	Em visita ao local foi observado trechos com detritos no passeio, pequena magnitude, sem sistema de drenagem.	Baixa - 1	Reduzida - 2	Reduzida - 2	Reduzida - 2	CM- Monitoramento periódico.
Talude na Praça Pedra Verde.	TS-A1	Movimentos de massa complexos, envolvendo escorregamentos de pequena magnitude, corrida de detritos	Corte acentuado no talude, quando da construção do estacionamento. As raízes da árvore existente na crista acelerou o processo de degradação do solo/rocha, acumulando água e tensões	Queda da árvore, além de detritos, que podem causar danos em veículos e pessoas	G4-G e G8	Ocorrência já registrada pela Proteção Civil. Foram instalados guardrails. Probabilidade média pois local de pouca circulação.	Média - 3	Moderada - 3	Residual - 1	Moderada - 3	CM - Visitas de campo em período chuvoso para acompanhamento de possíveis escorregamentos. AM - Instruir os moradores para não estacionarem próximo do local, tampouco circular na crista e base. AC - Elaborar projeto de estabilização.
Taludes na R. Henrique Lopes de Mendonça (com R. Amadeu Souza Cardoso).	TS-F1	Escorregamentos planares ou cunha em saprolito ou solo, de pequena ou média magnitude, englobando a crista.	Corte no talude, o qual desconfinou as foliações desfavoráveis à segurança do talude	Queda de árvore, atingimento de pessoas e veículos.	G4-X e G5, G6	Cenário hipotético, mas provável, a partir dos escorregamentos na base que condicionam maiores magnitudes de deslizamentos.	Média - 3	Acentuada - 4	Residual - 1	Moderada - 3	CM - Visitas de campo em período chuvoso para acompanhamento de possíveis escorregamentos; AC - Elaborar projeto de estabilização. Gabião pode ser viável, contudo sugere-se prever e acompanhar os riscos no processo construtivo, pois cortes na base para assentamento do gabião podem desencadear escorregamento.
	TS-F2	Escorregamentos planares ou cunha em saprolito ou solo, de média magnitude, englobando a crista.	Corte no talude, o qual desconfinou as foliações desfavoráveis à segurança do talude	Comprometimento da fundação do prédio à montante, atingimento de pessoas ou veículos	G4-X e G5	Verificado degrau de abatimento e trinca de tração na crista	Média-alta - 4	Acentuada - 4	Residual - 1	Moderada - 3	CM - Visitas de campo em período chuvoso para acompanhamento de possíveis escorregamentos. AM - Sobrepor lona na face do talude e crista em períodos chuvosos. AC - elaborar projeto de estabilização. Gabião pode ser viável, contudo, sugere-se prever e acompanhar os riscos no processo construtivo, pois cortes na base para assentamento do gabião podem desencadear escorregamento.

Figura 8 - Planilha FMEA, com informações e resultados consolidados.

## REFERÊNCIAS

ANPC – AUTORIDADE NACIONAL DE PROTEÇÃO CIVIL. **Elaboração de Planos de Emergência de Proteção Civil. Guia para a Caracterização de Risco no Âmbito da** Cadernos Técnicos PROCIV 9, setembro de 2009.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11682:2009: **Estabilidade de encostas**. Slope Stability. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO/IEC 31000:2018: **Sistema de Gestão de Riscos** – Diretrizes. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO/IEC 31010:2012: **Sistema de Gestão de Riscos** – Técnicas para o processo. 2012.
- BORGES, A.R.C. **Cartografia de Risco de Taludes no âmbito dos Planos de Emergência e Proteção Civil do Município do Porto**. Porto, 2017, 144 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.
- BUDETTA, P. Assessment of rockfall risk along roads. **Natural Hazard and Earth System Sciences**, v. 4, p. 71-81, 2004.
- CAMPOS, L.C. **Proposta de reanálise do risco geológico - geotécnico de escorregamentos em Belo Horizonte - Minas Gerais**. 2011. 139p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa. Rio de Janeiro: Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Desastres Naturais -PROJETO GIDES**. Acordo de Cooperação Internacional Brasil – Japão, Serviço Geológico do Brasil, 218 p., 2018.
- DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (Atual ANM). **Portaria nº 70.389**, 2017. Disp. em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnpm/documentos/portaria-dnpm-n-70389-de-17-de-maio-de-2017-seguranca-de-barragens/view>. Acessado em 25nov2021.
- ESPÓSITO, T. & PALMIER, L. Application of Risks Analysis Methods on Tailings Dams. **Soils & Rocks**, v. 36, p. 97-117, 2013.
- FIORI, A.P. & CARMIGNAMI, L. **Fundamentos de Mecânica dos Solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes** – 2ª ed. rev. e ampl. Curitiba: Ed. UFPR, 2009.
- HUGGET, R.J. Soil Landscape Systems: A model of soil genesis. **Geoderma**, v.13, p. 1-22, 1975.
- LAI, C.G.; BOZZONI, F.; MEISINA, C.; CONCA, D.; FAMA, A.; OZCEBE, A.G.; ZUCCOLO, E.; BONI, R.; POGGI, V.; COSENTINI, R.M.; VIANA DA FONSECA, A.; FERREIRA, C.; COELHO, C.; COELHO, J.; QUINTERO, J., RIOS, S.; MILLEN, M.; CORDEIRO, D.; OZTOPRAK, S.; BOZBEY, I.; OSER, C.; SARGIN, S.; AYSAL, N.; OZCEP, F.; KELESOGLU, M.K.; MACEK, M.; OBLAK, A.; PETROVIC, D.; KOSIC, M.; SMOLAR, J.; KUDER, S.; LOGAR, J. **Methodology for assessment of earthquake-induced risk of soil liquefaction at the four European testing sites (microzonation)**. Deliverable D2.7. V 1.0. Project Liquefact, H2020-DRA-2015, GA no. 700748. 2019. Disp. em: [http://www.liquefact.eu/wp-content/uploads/2020/03/D2.7\\_ter.pdf](http://www.liquefact.eu/wp-content/uploads/2020/03/D2.7_ter.pdf). Acessado em: 26nov2021.
- LI, YP.; HU, C.; JIAN, L.; Zhao, R.; Li, C. Evaluation of the stability of vegetated slopes according to layout and temporal changes. **J. Mt. Sci.** v. 18, p. 275–290, 2021.
- MENEZES, L.O. Metodologia para gestão de risco geológico-geotécnico em áreas urbanas: Os casos do concelho do Porto e Contagem (MG). Universidade Federal de Minas Gerais / Universidade do Porto (Tese de Doutorado – Cotutela). 540 p. 2021.
- MIL-STD-1629A. **Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Critically Analysis. Military Standard Procedures**, 24 November, 1980. Substitui a versão MIL-STD-1629 (SHIPS), November, 1974 e MIL-STD-2070 (AS), June, 1977.
- NOGUEIRA, F.R. **Gerenciamento de riscos ambientais associados a escorregamentos: contribuição às políticas públicas municipais para áreas de ocupação subnormal**. Rio Claro, 2002, 260p. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- PETRONILHO, M.R. **Avaliação do comportamento geotécnico de pilhas de estéril por meio de análise de risco**. Ouro Preto, 2010. 137p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto.
- PIERSON, L.; DAVIS, S.; VAN VICKLE, R. **Rockfall Hazard Rating System Implementation Manual. Federal Highway Administration (FHWA) Report FHWA-OR— EG-90-01**. FHWA, U.S. Department of Transportation, 1990.
- PMRR – Plano Municipal de Redução de Risco, © PMRR CONTAGEM, MG – 2ª Etapa: Elaboração do mapeamento das áreas de risco geológico. Fundação Israel Pinheiro @ FIP, Governo do Estado de Minas Gerais, Ministério das Cidades. 558p. 2017. Disponível em <https://www.israelpinheiro.org.br/documentos>. Acesso em 18 de dezembro de 2021.
- PORTO Câmara Municipal do Porto. **Carta Geotécnica do Porto. Notícia Explicativa**, 2003.
- PORTO Câmara Municipal do Porto. **Plano Diretor Municipal da Cidade de Porto**. Caracterização Biofísica. Disp. em: <https://www.cm-porto.pt/como-participar/como-participar>. Acessado em 11ago2020, 2018.
- PORTO Câmara Municipal do Porto. **Plano Diretor Municipal da Cidade de Porto. Mapa Interativo**. Disponível em: <https://geopdm.cm-porto.pt/>. Acessado em 11dez2020, 2020.
- PORTO Câmara Municipal do Porto. **Plano Diretor Municipal da Cidade de Porto. Mapa Interativo**, 2021
- PRATT, D. & SANTI, P.A. Landslide Hazard Rating System for Colorado Highways. **Proceedings of Rocky Mountain Geo-Conference**, November 7, 2014, Lakewood, Colorado. 2014
- ROBAINA, L.; TRENTIN, R.; LAURENT, F. **Zoneamento em unidades morfológicas da bacia do Rio Oudon, noroeste da França, a partir de MDT em ambiente SIG**. Geografia 0100-7912. 41. 2016
- SAE J1739. **Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMEA), Potential Failure Mode and Effects Analysis in Manufacturing and Assembly Processes**. Norma vigente (Process FMEA), 2009. Substituiu a versão SAE J1739, 1994.
- SILVA, L.C. **Aplicação do sistema de avaliação de perigo Rockfall Hazard Rating System (RHRS) aos taludes da BR-356/ Rodovia dos Inconfidentes, MG. Ouro Preto**, 2016, 140 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Núcleo de Geotecnia. Engenharia Geotécnica. Área de Concentração: Investigação Geológico-Geotécnica de Maciços Rochosos. Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto.
- UNDRR, 2019. **Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction**, Geneva, Switzerland, United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), 2019.
- VIANA DA FONSECA, A.; MILLEN, M.; ROMÃO, X.; QUINTERO, J.; RIOS, S.; MESLEM, A. **Design guidelines for the application of soil characterisation and liquefaction risk assessment protocols**. Deliverable D 3.3 - LIQUEFACT project, Horizon 2020 European Union funding for Research & Innovation, GA nº. 700748. Disp. em: [http://www.liquefact.eu/wp-content/uploads/2020/03/D3.3\\_bis.pdf](http://www.liquefact.eu/wp-content/uploads/2020/03/D3.3_bis.pdf). Acessado em: 26nov2021.
- WU, W.; SWITALA, B.; ACHARYA, M.; TAMAGNINI, R.; AUER, M.; GRAF, F.; DR. TE KAMP, L.; XIANG, W. Effect of Vegetation on Stability of Soil Slopes. **Numerical Aspect**. 10.1007/978-3-319-11053-0\_15, 2015.

Submetido em 10 de dezembro de 2021

Aceito para publicação em 15 de outubro de 2022