

Protocolo Padronizado para Mapeamento e Classificação Objetiva de Riscos Geotécnicos

Sérgio Murari Ludemann

Engenheiro Civil, Ludemann Engenharia, São Paulo, Brasil, sergio@ludemann.com.br

Felipe Cardoso Rodrigues

Geólogo, Ludemann Engenharia, São Paulo, Brasil, felipe.cardoso@ludemann.com.br

Adrian Torrico Siacara

Engenheiro Civil, Professor, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, adrian.torrico@usp.br

RESUMO: Este artigo apresenta o método GeoRisco LRS v0.1, um protocolo padronizado para elaboração de mapas de risco geológico-geotécnico, baseado na correlação entre critérios subjetivos e objetivos, minimizando ambiguidades na classificação de riscos. O método apresenta alta aplicabilidade em áreas onde estão disponíveis dados geológico-geotécnicos do subsolo para a caracterização do risco. O método estrutura-se em quatro etapas: (1) identificação de unidades geológico geotécnicas e caracterização de parâmetros de resistência, (2) identificação e espacialização dos mecanismos de movimento de massas, (3) análises de estabilidade via equilíbrio limite para obtenção do fator de segurança (FS), da probabilidade de ruína (P) e do índice de confiabilidade (β) e (4) correlação matricial com critérios de desempenho e risco, integrando ainda uma nomenclatura padronizada. A metodologia é utilizada em três estudos de caso, demonstrando a eficácia na transformação de dados geotécnicos em classificações de risco, oferecendo uma ferramenta replicável para gestão de áreas vulneráveis.

PALAVRAS-CHAVE: Mapeamento de Riscos, Estabilidade de Encosta, Probabilidade de Ruína, Índice de Confiabilidade, Terminologia.

ABSTRACT: This article presents the GeoRisco LRS v0.1 Method, a standardized protocol for developing geological-geotechnical risk maps based on the correlation between subjective and objective criteria, minimizing ambiguities in risk classification. The method has high applicability in areas where subsoil geological-geotechnical data is available for risk characterization. The method is structured in four steps: (1) identification of geological-geotechnical units and characterization of strength parameters, (2) identification and spatialization of mass movement mechanisms, (3) stability analyzes via limit equilibrium to obtain the safety factor (FS), the probability of failure (P) and the reliability index (β) and (4) matrix correlation with performance and risk criteria, also integrating a standardized nomenclature. Validated by three case studies, the protocol demonstrates effectiveness in transforming geotechnical data into risk classifications, offering a replicable tool for managing vulnerable areas.

KEYWORDS: Risk Mapping, Slope Stability, Probability of Failure, Reliability Index, Nomenclature.

1 INTRODUÇÃO

O mapeamento de riscos geológico-geotécnicos é fundamental para a prevenção de desastres e para a gestão de áreas vulneráveis. No Brasil, a prática mais comumente utilizada para a elaboração desses mapeamentos baseia-se em uma abordagem qualitativa, que classifica os riscos de forma subjetiva, embora fundamentada em critérios observacionais objetivos. Esses critérios reduzem a subjetividade na classificação, mas não a eliminam completamente. Entre eles, destaca-se o método descrito na metodologia “Brasil 2007” (Brasil, 2007), reconhecido como uma ferramenta prática e eficaz para o planejamento de ações de mitigação.

Entretanto, mesmo existindo critérios objetivos a serem seguidos na elaboração de um mapeamento de risco geológico-geotécnico utilizando uma abordagem qualitativa, os critérios de julgamento são essencialmente subjetivos e fortemente influenciados pela experiência do profissional responsável pelo mapeamento. Assim, uma mesma área pode apresentar classificações de risco distintas, dependendo da formação e da vivência de cada profissional envolvido no mapeamento. A partir do mapeamento desenvolvido,

são propostas diferentes medidas de mitigação para reduzir o risco, o que pode levar a divergências consideráveis na alocação de recursos.

Visando minimizar tais divergências na classificação do grau de risco, a proposta deste artigo é apresentar uma abordagem quantitativa para a elaboração de um mapeamento de risco geológico-geotécnico, com base em dados geomorfológicos, sondagens e parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais, apresentando uma sistematização que, mesmo aplicada por diferentes profissionais, possa apresentar reprodutibilidade adequada de resultados. O método desenvolvido é denominado GeoRisco LRS v0.1 e busca correlacionar o Grau de Risco subjetivo com parâmetros matematicamente definidos e objetivos, como o Índice de Confiabilidade (β) e a Probabilidade de Ruína. (P). A abordagem proposta possui potencial para ser utilizada tanto no monitoramento contínuo do risco quanto na tomada de decisões fundamentadas em critérios técnicos.

2 TERMINOLOGIA

Ao estudar o tema do mapeamento de risco geológico-geotécnico, uma questão que inicialmente se apresenta é sobre a terminologia utilizada por diferentes autores, tratando conceitos semelhantes com termos distintos e vice e versa. Apresenta-se a seguir a terminologia utilizada neste artigo:

- **Evento:** Fenômeno destrutivo, devido a processos naturais ou induzidos, em uma dada área com características, dimensões e localização geográfica registrada no tempo;
- **Suscetibilidade:** Possibilidade de ocorrência de um **Evento** com potencial para causar **Consequência**;
- **Perigo (Ameaça):** Probabilidade de ocorrência de um **Evento** com potencial para causar **Consequência**;
- **Consequência:** Danos sociais, ambientais, econômicas e/ou de imagem devidos a um dado **Evento**, atingindo um grupo ou comunidade **Vulnerável**;
- **Vulnerabilidade:** Característica de um elemento (indivíduo, grupo, sistema estrutural) exposto a um **Evento**, com predisposição de ser afetado ou susceptível a perdas. Segundo Bressani (2024), existem dois tipos de vulnerabilidades: **Inerente**, que depende das características do elemento, e; **Efetiva** (ou técnica), que depende do grau de exposição ao **Evento**. Neste artigo será utilizado o conceito da vulnerabilidade efetiva;
- **Risco:** Relação entre o **Perigo** (probabilidade de ocorrência de um **Evento**) e a sua **Consequência**;
- **Área de Risco:** Área passível de ser atingida pelo **Evento**, onde as estruturas e pessoas que habitam essa área estão expostas ao **Perigo**, possivelmente em graus distintos de **Vulnerabilidade**. Geralmente, no contexto das cidades brasileiras, essas áreas de risco correspondem a núcleos habitacionais de baixa renda (assentamentos precários, autoconstruções) construídos sobre as encostas ou junto aos seus pés.

3 DEFINIÇÃO DE RISCO

A maneira de definir o risco (R), conforme terminologia apresentada no item anterior e à bibliografia (Beck, 2019), pode ser apresentada através da equação 1 a seguir, ou seja, o risco pode ser quantificado, a partir da probabilidade de ocorrer o evento e, também, a consequência a ele associada.

$$R = P \cdot C \quad (1)$$

Onde: P = Probabilidade de ocorrer o Evento; C = Consequência deste Evento;

A partir da equação apresentada, existem várias formulações alternativas para expressar o risco. Segundo Aoki (2023) o risco deve ser expresso levando em consideração também a vulnerabilidade, ou seja:

$$R = P \cdot C \cdot V \quad (2)$$

Onde: V = Vulnerabilidade do(s) elemento(s) exposto(s) ao Evento;

Dell'Avanzi (2014) apud Aoki (2023) propõe correlações numéricas entre diversas situações de exposição, que podem caracterizar a vulnerabilidade de um elemento, basicamente em duas condições distintas: com a possibilidade apenas de perdas materiais e com a possibilidade de perda de vidas humanas.

Além da vulnerabilidade, critérios de gerenciamento também podem influir na avaliação do risco e, portanto, devem ser considerados. Segundo Nogueira (2002), levando-se em conta critérios de gerenciamento, o risco pode ser definido de maneira mais abrangente e pode ser representado pela equação 3.

$$R = P \cdot (fA) \cdot C \cdot (fV) \cdot g^{-1} \quad (3)$$

Onde: A = Ameaça (Perigo); g = grau de gerenciamento; $*$ = Convolução: concomitância e mútuo condicionamento;

Conceitos fundamentais de análise probabilística, como a confiabilidade em modelos numéricos avançados, são abordados em maior profundidade em Siacara *et. al.* (2022, 2024a e 2024b).

Nogueira (2002) discute em detalhes as possíveis maneiras de considerar o grau de gerenciamento na avaliação do risco e apresenta uma proposta de classificação subjetiva de gerenciamento em função da abordagem dominante dada pelo agente responsável pelo gerenciamento.

A tarefa de matematizar a consequência C de um determinado Evento é complexa, pois não se trata apenas de quantificar (precificar) perdas materiais, mas também de quantificar (precificar?) perda de vidas humanas.

Devido às dificuldades em alcançar um consenso sobre os critérios objetivos para quantificação da vulnerabilidade, gerenciamento e consequências, os mapas de risco, geralmente elaborados de forma subjetiva, acabam incorporando todos esses conceitos ao atribuir um determinado grau de risco a uma área específica. No presente artigo, utilizaremos essa mesma conceituação abrangente, ou seja, de incorporar vulnerabilidade, gerenciamento e consequências quando nos referirmos ao risco, mas acrescentaremos à classificação dos graus de risco uma correlação entre os critérios subjetivos com a probabilidade de ruína (P), com o índice de confiabilidade (β) e com os fatores de segurança de uma determinada área de risco em estudo.

4 MAPEAMENTO SUBJETIVO DE RISCO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO

Quando um mapeamento de risco geológico-geotécnico é solicitado pelo agente gerenciador (público ou privado), normalmente não se dispõe de dados de caracterização do subsolo da área na qual se pretende efetuar tal mapeamento de risco. Comumente o profissional encarregado desta avaliação inicial do grau de risco geológico-geotécnico dispõe somente de dados topográficos, imagens aéreas e visitas de campo para inspeção das áreas. Nessas condições e, levando em conta que estudos desta natureza geralmente estão associados a fases iniciais de planejamento de ações para mitigação do risco, é prática comum do meio técnico lançar mão de critérios subjetivos para julgamento e classificação dos graus de risco geológico-geotécnicos.

Dentre os critérios disponíveis na literatura, o mais comumente utilizado no Brasil é o método “Brasil 2007”, divulgado pelo Ministério das Cidades, em convênio com o IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (Brasil 2007). Neste método de classificação, os graus de risco são divididos em quatro classes, a saber: R1 – Risco Baixo; R2 – Risco Médio; R3 – Risco Alto; R4 – Risco Muito Alto, sendo claramente definidos os condicionantes geológico-geotécnicos associados a cada grau de risco, caracterizando a síntese do diagnóstico efetuado, bem como estão claramente definidas as ações recomendadas, como síntese das conclusões sobre o mapeamento efetuado.

Para minimizar a subjetividade de julgamento, foram estabelecidos 8 passos a serem seguidos durante a elaboração do mapeamento: 1º Passo: Dados Gerais de moradia e moradores; 2º Passo: Caracterização do Local; 3º Passo: Água no Subsolo; 4º Passo: Vegetação no Talude ou Proximidades; 5º Passo: Sinais de Movimentação (feições de instabilidade); 6º Passo: Tipos de Processos de Instabilização esperados ou já ocorridos; 7º Passo: Problemas na Estrutura da Edificação; 8º Passo: Determinação do Grau de Risco. A descrição detalhada das atividades em cada passo pode ser vista no referido trabalho “Brasil 2007”. Como resultado do mapeamento, os setores de uma determinada área de risco classificados como sendo de graus de risco R1 e R2 demandarão ações de monitoramento, enquanto os setores classificados como sendo de graus de risco R3 e R4 demandarão intervenções físicas para mitigação do risco, por meio de obras de estabilização de encostas e de reurbanização das áreas afetadas. Com base nos critérios subjetivos definidos em “Brasil 2007”, para os setores classificados como R3 e R4, este artigo propõe uma correlação entre os graus de risco e

parâmetros objetivos e quantificáveis, fundamentados no fator de segurança (FS), na probabilidade de ruína (P) e no índice de confiabilidade (β).

5 PROPOSTA DE MÉTODO GEORISCO LRS V0.1 – MAPEAMENTO OBJETIVO DE RISCO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

Este artigo apresenta um protocolo inicial padronizado para o mapeamento objetivo de risco geológico-geotécnico, denominado método GeoRisco LRS v0.1. Embora esta proposta ainda seja preliminar, ela constitui a base para refinamentos em trabalhos acadêmicos futuros. O método visa não apenas avaliar os riscos geotécnicos, mas também possibilitar a reavaliação desses riscos após a implementação de medidas de mitigação. Essa reavaliação é realizada com base em mapeamentos prévios, fundamentados em critérios subjetivos, que identificam áreas com graus de risco Alto (R3) ou Muito Alto (R4).

Como as intervenções nas áreas de risco R3 e R4 requerem a elaboração de projetos de consolidação geotécnica e tais projetos devem seguir as prescrições da norma ABNT-NBR 11.682 (2009) – Estabilidade de Encostas. Nesses casos, tornam-se obrigatórias atividades como: a programação da investigação geológica e geotécnica, a caracterização de perfis geotécnicos, a definição do tipo de mecanismo de instabilização, a medição dos parâmetros de resistência dos materiais, a definição dos modelos de cálculo com seus respectivos parâmetros e, por fim, a concepção do projeto de mitigação de riscos. No entanto, a versão atual e vigente desta norma se baseia apenas na definição determinística do FS e não define correlações estatísticas entre FS , P e β . Com o objetivo de suprir essa lacuna, um dos objetivos iniciais deste artigo é propor uma correlação entre esses parâmetros, embora tais relações provavelmente precisem ser adaptadas para cada local, em função das incertezas nas propriedades dos materiais e das condições climáticas específicas de cada área.

5.1. Identificação de Unidades Geológico-Geotécnicas e Caracterização dos Parâmetros de Resistência

A identificação das unidades geológico-geotécnicas parte da interpretação dos dados de sondagens, ensaios e visitas a campo, o que permitirá o traçado posterior dos perfis geotécnicos. Estes perfis são definidos pela interpolação dos pontos investigados, principalmente sondagens a percussão e mistas, formando um modelo geológico-geotécnico para o local de interesse.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais, como a coesão e o ângulo de atrito, bem como os índices físicos, como o peso específico, são definidos com base em ensaios laboratoriais, retroanálises (em casos de rupturas já ocorridas), dados bibliográficos ou, em estágios preliminares dos projetos de consolidação geotécnica, por meio de correlações empíricas com o índice de número de golpes do SPT (N_{SPT}).

Como os materiais naturais possuem uma variabilidade intrínseca de seus parâmetros de resistência, é válido considerá-los como variáveis aleatórias, como a distribuição normal (gaussiana), por exemplo. A distribuição é definida por medidas estatísticas, como o valor médio e o desvio padrão, obtidas a partir de campanhas de ensaios ou, na ausência de dados locais, por meio de referências bibliográficas especializadas. Adicionalmente, histogramas são utilizados para identificar o *best fit* e determinar a distribuição probabilística que melhor representa o comportamento dos materiais.

Nas fases iniciais de estudos preliminares de consolidação geotécnica é muito comum que o número de ensaios seja insuficiente para se ter uma representatividade da distribuição dos valores de resistência. Portanto, nesses casos, recorre-se à valores de bibliografia especializada. Quando se faz necessário utilizar dados bibliográficos, é fundamental informações que representem o contexto geológico da área em estudo, levando-se em conta também o coeficiente de variação (CV) destes parâmetros. O CV é dado como uma razão percentual do desvio padrão (σ) e valor médio do parâmetro geotécnico (μ). Ou seja, é o desvio padrão normalizado pela média de cada parâmetro, permitindo comparar a variação dos parâmetros entre si, conforme equação 4.

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \cdot 100\% \quad (4)$$

5.2. Identificação e Espacialização dos Mecanismos de Movimento de Massas

Para uma abordagem adequada do problema de estabilidade de encostas, é fundamental, primeiramente, identificar quais são os mecanismos possíveis de movimentos gravitacionais de massa (MGM) na área em

estudo. Esses mecanismos podem ser, de forma geral, classificados em quatro categorias principais: deslizamento planar, deslizamento rotacional, fluxo de detritos e queda de blocos. Para cada tipo de mecanismo, define-se a área crítica, ou área fonte, e a área de dispersão, a partir de critérios geomorfométricos. Uma metodologia recomendada para este fim é o manual técnico da CPRM denominado Projeto GIDES (2018), no qual são descritos critérios geomorfométricos, baseados em experiências práticas, que permitem a espacialização dos locais onde os mecanismos de movimento de massas poderão ocorrer. Para uma correta aplicação destes critérios e uma avaliação assertiva dos locais potencialmente críticos para cada tipo de movimento de massas é necessário que esteja disponível, para a área de estudo, uma base topográfica de precisão, sendo mais assertivas as previsões quanto mais precisa for a base topográfica.

Inicialmente, a metodologia GeoRisco LRS v0.1 é aplicada apenas para os mecanismos de deslizamento planar e deslizamento rotacional. Para outros mecanismos, como o fluxo de detritos e queda de blocos, delimita-se a área de perigo e sobrepõe-se com as edificações ou estruturas vulneráveis para assim identificar a área de risco. Na intersecção destas áreas, adota-se grau de risco R4 - Muito Alto.

5.3. Análises de Estabilidade Probabilísticas

A análise de estabilidade dos mecanismo de deslizamento planar e deslizamento rotacional usualmente é realizada por meio análises de estabilidade determinísticas, utilizando-se métodos de equilíbrio limite e obtendo-se como resultado um único valor para o FS .

Em análises de estabilidade probabilísticas, utilizando o método de Simulação de Monte Carlo (SMC), considera-se a variabilidade dos parâmetros de resistência dos materiais nas simulações, obtendo-se com estas diversos valores de FS . A razão entre o número de análises que indiquem ruptura e o número total de análises em uma SMC é a Probabilidade de Ruína (P). Adicionalmente, a dispersão dos valores de FS é indicada pelo desvio padrão de FS (σ_{FS}). As medidas de probabilidade são expressas pelas equações de SMC e a seguinte aproximação de segundo momento a seguir.

$$P = \frac{N_{ruptura}}{N_{total}} \times 100\% \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\overline{FS} - 1}{\sigma_{FS}} \quad (6)$$

$$P \approx \Phi(-\beta) \quad (7)$$

Onde: P = Probabilidade de Ruína; $N_{ruptura}$ = N° de análises com $FS < 1$ (ruptura); N_{total} = N° total de análises; β = Índice de Confiabilidade; $\Phi(.)$ = Função de distribuição cumulativa gaussiana padrão.

5.4. Correlação Matricial entre os Critérios de Desempenho e de Risco

Para associar os valores de P e do β aos graus de risco definidos em “Brasil 2007”, utilizou-se a publicação USACE (2020), que mostra os níveis de desempenho associados aos valores probabilísticos, conforme apresentado na Tabela 1. Observa-se que a tabela da USACE (2020) foi originalmente desenvolvida para aplicação em barragens.

Tabela 1. Avaliação dos níveis de desempenho de uma estrutura associados à medidas probabilísticas (USACE, 2020) e proposta de correlação aos graus de risco (Brasil, 2007)

Desempenho	Método USACE		Grau de Risco adotado - GeoRisco LRS v0.1
	β	P	
Alto	5,0	$3,00 \times 10^{-7}$	Baixo - R1
Bom	4,0	$3,00 \times 10^{-5}$	Baixo - R1
Acima da média	3,0	0,0013	Baixo - R1
Abaixo da média	2,5	0,006	Médio - R2
Pobre	2,0	0,023	Alto - R3
Não satisfatório	1,5	0,07	Alto - R3
Perigoso	1,0	0,16	Muito Alto - R4

Com base nesta tabela e nas normas vigentes no Brasil, propõe-se em seguida uma correlação entre esses limites de P e β e os valores de FS , conforme apresentado na Tabela 2. Vale ressaltar que a relação entre β , P e FS ora apresentada é uma proposta inicial e será refinada em trabalhos acadêmicos posteriores.

A fim de extrapolar a interpretação entre as seções transversais analisadas, é necessário definir uma espacialização geomorfológica. Este critério pode ser dado por meio de inclinações semelhantes entre as seções estudadas, definidas para cada unidade geológico-geotécnica, e também pelos critérios de espacialização definidos no Projeto GIDES (2018), para um dado tipo de movimento de massa em estudo. Ou seja, a correlação espacial entre β , P e FS e a inclinação da encosta é específica para cada local de estudo.

Tabela 2. Limites adotados de grau de risco baseado em medidas probabilísticas

Grau de Risco	β	P	FS
Baixo - R1	$\beta > 3,0$	$P < 0,1\%$	$FS > 1,5$
Médio - R2	$2,5 < \beta \leq 3,0$	$0,1\% \leq P < 0,6\%$	$1,3 < FS \leq 1,5$
Alto - R3	$1,5 < \beta \leq 2,5$	$0,6\% \leq P < 7\%$	$1,1 < FS \leq 1,3$
Muito Alto - R4	$\beta \leq 1,5$	$P \geq 7\%$	$FS \leq 1,1$

6 ESTUDO DE CASOS

Com base nas considerações anteriores, a seguir são apresentados três exemplos de aplicação.

6.1. Alto da Alegria – Parque Grajaú – São Paulo – SP

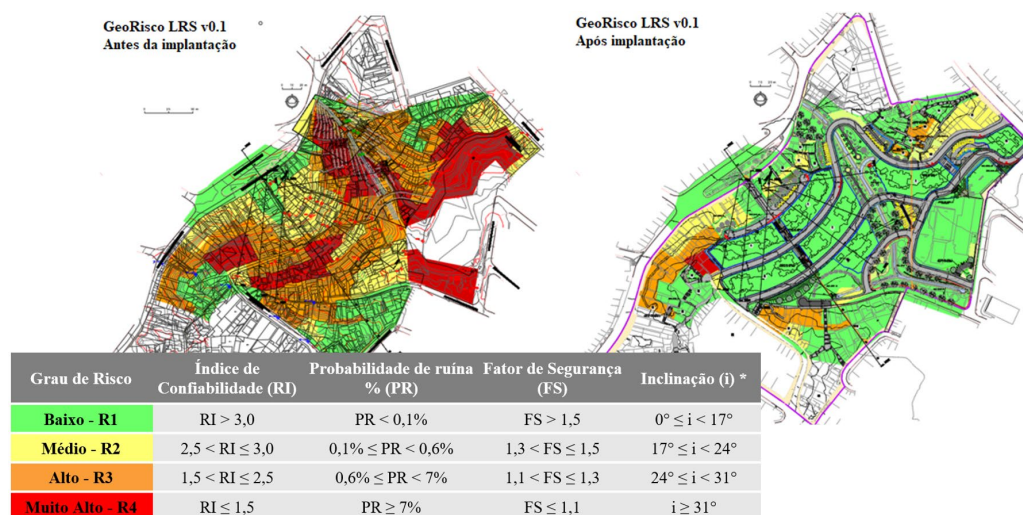


Figura 1. Mapeamento de risco do Alto da Alegria com o método GeoRisco LRS v0.1

6.2. Morro dos Macacos – Mata Virgem – São Paulo – SP

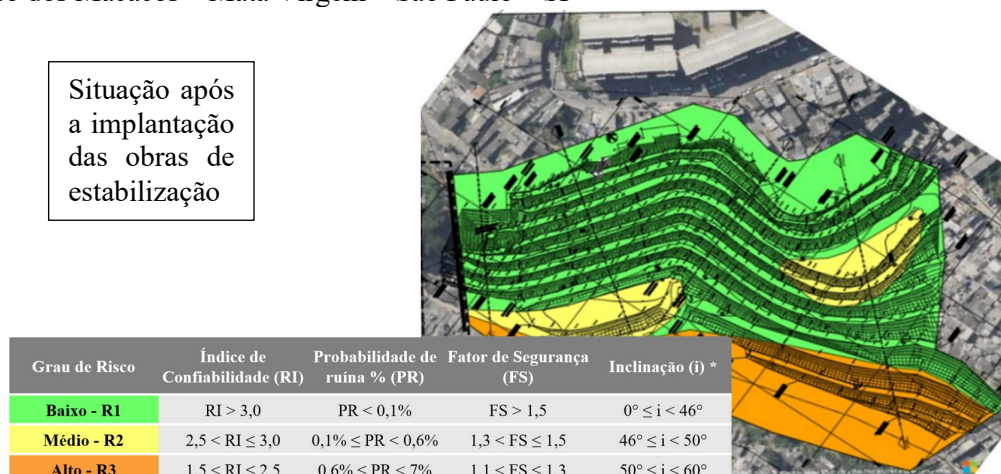


Figura 2. Mapeamento de risco do Morro dos Macacos com o método GeoRisco LRS v0.1

6.3. Vila Sahy – São Sebastião – SP

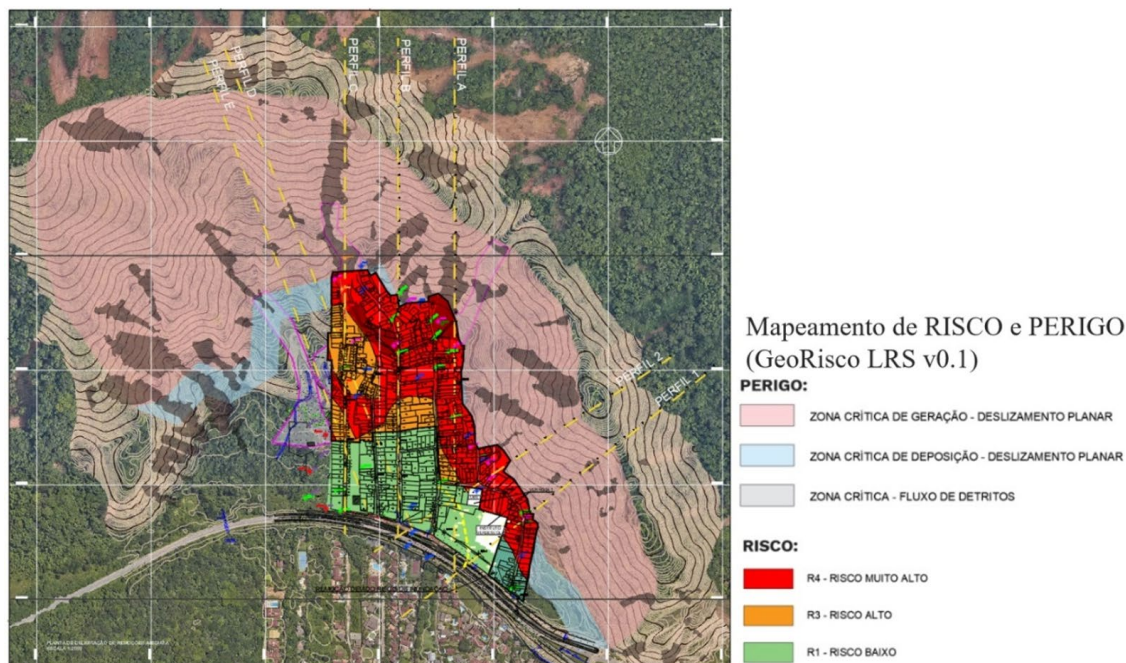


Figura 3. Mapeamento de risco da Vila Sahy com o método GeoRisco LRS v0.1

7 CONCLUSÕES

O método GeoRisco LRS v0.1 proposto foi utilizado nos estudos de caso apresentados, onde foi possível concluir que se trata de um procedimento através do qual se consegue um mapeamento mais preciso dos setores de risco de uma determinada área, desde que estejam disponíveis dados que permitam a elaboração de análises de estabilidade probabilísticas da encosta em estudo. Por meio deste método, é possível avaliar os diferentes graus de risco tanto antes quanto após a implementação de intervenções destinadas à consolidação geotécnica da área.

Por ser um método de classificação de risco baseado em cálculos probabilísticos de estabilidade, uma vez utilizando os mesmos dados de entrada, diferentes profissionais terão como resultado mapas de risco bastante próximos entre si, diminuindo a dependência entre o resultado do mapeamento de risco geológico-geotécnico e a experiência do profissional encarregado deste mapeamento.

No caso do Alto da Alegria, foi possível avaliar a classificação do risco geológico e geotécnico antes e depois das obras de estabilização, devido à disponibilidade dos projetos das intervenções. Para o Morro dos Macacos, estava disponível apenas a situação após a execução da obra. Já no caso da Vila Sahy, apenas a situação antes das intervenções pôde ser analisada, uma vez que não houve acesso aos projetos das obras implantadas, impossibilitando a avaliação do risco após as intervenções.

Não fez parte do escopo do presente artigo a elaboração de propostas de quantificação da vulnerabilidade, das consequências e do gerenciamento. Estes conceitos foram considerados como intrínsecos na classificação objetiva de risco, tal como já ocorre atualmente nas classificações subjetivas de risco. Para que se possa quantificar o risco geológico-geotécnico apenas em termos numéricos, eliminando por completo os critérios subjetivos de julgamento, outros trabalhos acadêmicos deverão estudar critérios de matematização da vulnerabilidade, das consequências e do gerenciamento.

O método GeoRisco LRS v0.1 apresentado constitui uma versão inicial, passível de aprimoramentos. Futuras versões poderão incorporar refinamentos nos critérios probabilísticos, inclusão de dados adicionais e melhorias na integração de informações geotécnicas, de modo a aumentar a precisão, a aplicabilidade e a robustez do mapeamento de risco.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Arqta Maria Teresa Diniz Manzano, Diretora de Projetos e Programas da

CDHU – Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano do Estado de São Paulo e à Arqta Maria Teresa Cardoso Fedeli, Secretária Executiva do Programa Mananciais da SEHAB – Secretaria de Habitação da PMSP – Prefeitura Municipal de São Paulo, pela autorização na publicação dos dados referentes às áreas apresentadas como estudos de caso. Os autores agradecem, também, o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP; número do processo 2023/06123-9).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682 - *Estabilidade de Encostas*.
- Aoki, N. (2023). *Fator de Segurança e Risco geotécnico*. Palestra no Instituto de Engenharia SP / DTG-Divisão Técnica de Geotecnia.
- Arêdes, A. C. N. D. B. (2019). *Banco de dados de parâmetros geotécnicos de solos residuais de gnaiss e aplicação à análise de estabilidade de taludes probabilística*.
- Beck, A.T. (2019). *Confiabilidade e Segurança de Estruturas*. Elsevier Editora Ltda, Sao Paulo, Brasil.
- Brasil. (2007). *Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios*. Brasília: Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT.
- Bressani, L. (2024). *Gestão de Riscos Geológico-Geotécnicos: Conceitos e Instrumentos – Casos e Aprendizados Risco, Perigo, Danos e Prejuízos, Vulnerabilidades*. Programa de Pós-graduação Eng. Civil – Construção e Infraestrutura -UFRGS.
- Cerri, L.E.S.; Carvalho, C.S. (1990). *Hierarquização de Situações de Risco em Favelas do Município de São Paulo, Brasil - Critérios e Metodologia*. Anais do Simpósio Latino-Americano sobre Risco Geológico Urbano, 1. São Paulo: ABGE.
- Macedo, E.S., Bressani, L. A. (2013). *Diretrizes para o Zoneamento da Suscetibilidade, Perigo e Risco de Deslizamentos para Planejamento do Uso do Solo*. ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, ABMS – Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, CPRM – Serviço Geológico do Brasil.
- Mascarenhas, P. V. (2022). *Risco de Ruptura de Encosta Causada por Chuva com Consequência para Oleodutos e Gasodutos na Serra do Mar implementando a Análise Não Saturada, Transiente e Fracionária*. Universidade de Brasília (UnB).
- Nogueira, F. (2002). *Gerenciamento de Riscos Ambientais Associados a Escorregamentos: Contribuição às Políticas Públicas Municipais para Áreas de Ocupação Subnormal*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Brasil.
- Projeto GIDES (2018). *Mapeamento de Risco Geológico-geotécnico – Metodologia (Vol. 1) – Acordo de Cooperação Internacional Brasil - Japão*. CPRM – Serviço Geológico do Brasil;
- Roscience. (2024). *Slide2 Documentantion - Probabilistic Analysis*.
- Siacara, A. T., Beck, A. T., & Ji, J. (2024a). Impact of random field simulations on FEM-based earth slope reliability. *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 42, p.7873-7891, <https://doi.org/10.1007/s10706-024-02956-5>.
- Siacara, A. T., Guo, X., & Beck, A. T. (2024b). Probabilistic analysis of shallow foundation on earth slope using an active learning surrogate-centered procedure. *Computers and Geotechnics*, vol. 175, 106659, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106659>.
- Siacara, A. T., Pellizzer, G. P., Beck, A. T., & Futai, M. M. (2022). Reliability-based design optimization of a concrete dam. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, vol. 15, no. 5, e15501, <https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000500001>.
- USACE (2020). *U.S. Army Corps of Engineers. Introduction to Probability and Reliability Methods for Use in Geotechnical Engineering*. ETL 1110-2-588.