

SUSCETIBILIDADE DE RUPTURA DE TALUDES POR FRATURAS: UMA ABORDAGEM A PARTIR DE LINEAMENTOS MORFOESTRUTURAIS E DA ANÁLISE ESTRUTURAL RÚPTIL

✉ Fernando Machado Alves^{1,2*}, ✉ Claudio Riccomini^{3,4}, ✉ Karina da Silva Lima^{2,5}

¹ Programa de Pós-Graduação em Energia, Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, CEP 05508-010, São Paulo, SP, Brasil. *E-mail*: fernando.lampiao.alves@gmail.com

² Regea Geologia, Engenharia e Estudos Ambientais, CEP 05595-000, São Paulo, SP, Brasil.

³ Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, CEP 05508-010, São Paulo, SP, Brasil. *E-mail*: riccomin@usp.br

⁴ Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, CEP 05508-080, São Paulo, SP, Brasil.

⁵ Programa de Pós-Graduação em Ciências do Sistema Terra e Sociedade, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, CEP 05508-080, São Paulo, SP, Brasil. *E-mail*: karina2.lima@alumni.usp.br

*Autor correspondente



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License.

RESUMO

O artigo aborda a avaliação da suscetibilidade de rupturas de taludes por fraturas, utilizando lineamentos morfoestruturais e análise estrutural rúptil. O estudo foi realizado nas rodovias SP-98 e SP-55, no Litoral Norte do Estado de São Paulo, que apresentam alta suscetibilidade a rupturas devido ao relevo acidentado e altos índices de pluviosidade. O objetivo principal foi analisar como as descontinuidades dos maciços rochosos afetam a estabilidade dos taludes nessas rodovias a partir de estudos de macroescala, a partir da correlação de dados de fraturas com lineamentos morfoestruturais em ambiente SIG. Os dados foram coletados de diversas fontes, incluindo modelos digitais de elevação (MDE), mapas de isobases, dados de fraturas obtidos da literatura e em levantamentos de campo. A análise foi realizada em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), no qual a direção e o mergulho das descontinuidades são analisados de maneira regional, e não localmente. A análise de rupturas parte da relação da orientação das descontinuidades com os taludes de corte representados pelo traçado da rodovia, de modo a se avaliar rupturas planares, em cunha e tombamentos de blocos. Os mapas de suscetibilidade apresentaram altos índices de acerto, com melhores resultados para a resolução espacial de 750 m, alcançando 82,9,1% na SP-98 e 92,2% na SP-55. Conclui-se que a análise combinada de lineamentos morfoestruturais e tectônica rúptil é eficaz na avaliação de rupturas em taludes, classificando maciços rochosos e solos de alteração que preservam descontinuidades preexistentes. Dessa forma, o método proposto pode auxiliar na compreensão de processos relevantes nas análises da suscetibilidade a escorregamentos na escala de semidetalhe, casos nos quais a presença de descontinuidades vem sendo pouco considerada na maior parte dos trabalhos desta natureza.

Palavras-chave: Suscetibilidade; Movimentos de massa; Gestão de riscos de desastres naturais; Lineamentos morfoestruturais; Análise estrutural rúptil; Obras lineares; Rupturas de taludes.

ABSTRACT

SLOPE FAILURE SUSCEPTIBILITY DUE TO FRACTURES: AN APPROACH BASED ON MORPHO-STRUCTURAL LINEAMENTS AND BRITTLE STRUCTURAL ANALYSIS. This paper addresses the evaluation of slope failure susceptibility caused by fractures using morphostructural lineaments and brittle structural analysis. The study comprises the SP-98 and SP-55 highways in the northern coastal region of São Paulo State, which are highly susceptible to failures due to rugged topography and high rainfall rates. The main objective was to analyze how rock mass discontinuities affect slope stability along these highways based on macro-scale studies. The methodology correlates fracture data with morphostructural lineaments. We used various data sources, including Digital Elevation Models (DEMs), isobase maps, fracture data obtained from the literature, and field surveys. The analysis was performed within a Geographic Information System (GIS) environment, incorporating the strike and dip of discontinuities, which were assessed on a regional scale rather than locally. Slope failure analysis was based on the relationship between the geometry of discontinuities, and the road cut slopes represented by the highway alignment, evaluating planar, wedge, and toppling failures. The susceptibility maps showed high accuracy, with the best results achieved at a spatial resolution of 750 m, reaching 82,9% accuracy for SP-98 and 92,2% for SP-55. The study concludes that combining morphostructural lineaments and brittle tectonic data is a valuable way to evaluate slope failures and classify rock masses and soil formed by in-situ weathering that preserve preexisting discontinuities. Although the significance of discontinuities is recognized, their role is often underrepresented in most studies of this kind. This paper contributes to understanding relevant processes in susceptibility analysis for landslides.

Keywords: Susceptibility; Mass movements; Natural disaster risk management; Morphostructural lineaments; Brittle structural analysis; Linear infrastructures; Slope failures.

RESUMEN

SUSCEPTIBILIDAD A LA RUPTURA DE TALUDES POR FRACTURAS: UN ENFOQUE A PARTIR DE LINEAMIENTOS MORFOESTRUCTURALES Y DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL FRÁGIL. El artículo aborda la evaluación de la susceptibilidad a rupturas de taludes inducidas por fracturas, mediante el uso de lineamientos morfoestructurales y análisis estructural frágil. El estudio fue realizado en las carreteras SP-98 y SP-55, en el Litoral Norte del Estado de São Paulo, las cuales presentan alta susceptibilidad a rupturas debido al relieve accidentado y a los altos índices de pluviosidad. El objetivo principal fue analizar cómo las discontinuidades de los macizos rocosos afectan la estabilidad de los taludes en estas carreteras, a partir de estudios a macroescala. La metodología correlaciona datos de fracturas con lineamientos morfoestructurales. Los datos fueron recolectados de diversas fuentes, incluyendo modelos digitales de elevación (MDE), mapas de isobases, datos de fracturas obtenidos de la literatura y de levantamientos de campo. El análisis se realizó en un entorno de Sistema de Información Geográfica (SIG), en el cual la dirección y el buzamiento de las discontinuidades fueron evaluados a escala regional y no local. El análisis de las rupturas parte de la relación entre la orientación de las discontinuidades y los taludes de corte representados por el trazado de las carreteras, con el fin de evaluar fallas planas, en cuña y vuelcos de bloques. Los mapas de susceptibilidad presentaron altos índices de acierto, con mejores resultados para la resolución de 750 m, alcanzando el 82,9% en la SP-98 y el 92,2% en la SP-55. Se concluye que el análisis combinado de lineamientos morfoestructurales y datos de tectónica frágil es eficaz en la evaluación de rupturas en

taludes, permitindo clasificar macizos rocosos y suelos de alteración que preservan discontinuidades preexistentes. Este artículo puede contribuir a la comprensión de procesos relevantes en el análisis de la susceptibilidad a deslizamientos. Aunque la literatura presenta un amplio contenido de evaluaciones en escala de detalle mediante metodologías cinemáticas, para la escala semidetallada la presencia de discontinuidades ha sido poco considerada en la mayoría de los trabajos de esta naturaleza.

Palabras clave: Susceptibilidad; Movimientos en masa; Gestión del riesgo de desastres naturales; Lineamientos morfoestructurales; Análisis estructural frágil; Obras lineales; Rupturas de taludes.

1 INTRODUÇÃO

O estudo de estabilidade de taludes é uma das aplicações mais comuns da análise de fraturamento. O arranjo das fraturas é um fator determinante na orientação dos cortes mais estáveis de taludes em maciços rochosos com descontinuidades. A densidade de fraturas de um maciço rochoso é outra característica relevante e pode constituir variável de competência geotécnica da rocha, uma vez que os maciços intensamente fraturados apresentam maior percolação de água e maior alteração química da rocha, tornando-os mais instáveis, ao reduzir a resistência ao cisalhamento.

A análise cinemática de rupturas é uma maneira de se avaliar o condicionamento de movimentos de massa relacionados diretamente às fraturas (descontinuidades) e à tectônica rúptil. Estudos sistemáticos de famílias de estruturas, quando associados a análise cinemática, podem orientar os traçados de obras lineares, principalmente para posicionar os taludes concebidos em situações que não acarretem as suscetibilidades cinemáticas em relação às orientações desfavoráveis de fraturas previstas no local.

O planejamento da construção de obras lineares de grande extensão e que atravessam regiões de alta diversidade em termos de tipos litológicos e de estruturas requer a realização de estudos de detalhe envolvendo a análise de fraturamento, ou análise estrutural rúptil, que devem considerar em um primeiro momento a suscetibilidade aos movimentos de massa, e, em fase posterior, os riscos geológicos e ambientais potenciais envolvidos. A realização desses estudos em exposições de rochas nem sempre é possível diante das condições de acesso, prazos e custos.

A análise de lineamentos morfoestruturais é outro instrumento relevante para a previsão de orientação de fraturas e avaliação de suscetibilidade de ruptura de taludes e movimentos de massas. Uma abordagem integrada, em escala regional, que

permita correlacionar lineamentos morfoestruturais e padrões de fraturamento obtidos a partir de dados de campo, constitui uma ferramenta poderosa na previsão de orientações de fraturas em locais de interesse. Esses dados de campo podem ser obtidos de uma amostragem regional, em locais dispersos e não necessariamente situados ao longo do traçado das obras lineares. Com base nessa abordagem, podem ser efetuados a compartimentação e o mapeamento de trechos de obras lineares com diferentes propensões ou suscetibilidade a rupturas. Essa compartimentação, somada a índices críticos de precipitação, são fundamentais na elaboração de um sistema de alerta de desastres naturais voltados aos escorregamentos (e.g., Fernandez et al., 2022).

Os mapas de suscetibilidade refletem direções de fragilidade estrutural e permitem a seleção de traçados mais favoráveis e estáveis frente às escavações. Pode-se ainda elaborar mapas que simulam diferentes direções previamente, de modo que o planejamento da via linear tenha a possibilidade de selecionar traçados com direção de menor suscetibilidade.

A integração dos critérios de suscetibilidade com a geomorfologia do terreno possibilita a seleção de áreas onde cortes em solo e rocha são realmente necessários. Essa abordagem permite identificar situações de corte potencialmente críticas. Com base nessas informações, o projetista pode planejar desvios estratégicos ou a adoção de obras de arte especiais, ajustando o traçado da obra linear para evitar direções ou lados da encosta que comprometam a estabilidade, de modo a priorizar alternativas que proporcionem melhores condições de segurança.

Este trabalho tem como finalidade avaliar a suscetibilidade de ruptura de taludes por fraturas causada por descontinuidades do maciço rochoso e solos de alteração com descontinuidades preservadas, a partir de lineamentos morfoestruturais e da análise estrutural rúptil. Para esta avaliação foram

selecionados como focos de estudos as rodovias SP-98 (Mogi-Bertioga) e SP-55 (BR-101, Rodovia Rio-Santos, no trecho entre Santos e Ubatuba), que desempenham um papel essencial no Litoral Norte do Estado de São Paulo, por conectar várias cidades e facilitar o transporte de pessoas e bens. Contudo, devido às características do relevo acidentado, essas vias apresentam elevada suscetibilidade a rupturas de taludes. Esses eventos geológicos, impulsionados por fatores naturais e antrópicos, podem provocar interrupções no tráfego, danos à infraestrutura, custos elevados de reparo e perdas de vidas. Adicionalmente, o trabalho busca demonstrar a aplicabilidade de metodologias baseadas em lineamentos morfoestruturais e nos conhecimentos de tectônica rúptil como condicionantes para movimentos de massa e avaliação de riscos geológicos. Secundariamente, o estudo pretende fornecer informações relevantes que subsidiem a tomada de decisões e a formulação de estratégias eficientes de gestão de riscos de obras lineares

O desenvolvimento deste estudo é justificado pela necessidade de uma gestão eficaz dos riscos de desastres naturais e induzidos. A avaliação do perigo e do risco geológico associado a movimentos de massa tornou-se um tema de grande relevância para geocientistas e profissionais de engenharia. No Brasil, esse interesse é impulsionado pela demanda por medidas que reduzam os riscos desse tipo de desastre (White, 1974; Wisner et al., 2004) e pela criação da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDC), regulamentada pela Lei 12.608/2012 (Brasil, 2012). Globalmente, observa-se também a necessidade de responder às diretrizes de políticas ESG (Environmental, Social and Governance) e aos desafios impostos pelas mudanças climáticas. Nesse contexto, destaca-se a importância de diagnosticar os efeitos locais das mudanças climáticas sobre desastres naturais, como a saturação do solo e a deflagração de movimentos de massa devido a eventos hidrológicos extremos (Organização das Nações Unidas [ONU], 2021). Assim, avaliações de riscos e suscetibilidade a deslizamentos têm se tornado parte fundamental de programas globais de mitigação e adaptação aos impactos socioeconômicos e ambientais das mudanças climáticas (United Nations Environment Programme [UNEP], 2021; United Nations International Strategy for Disaster Reduction [UNISDR], 2009).

A gestão eficaz dessas rodovias depende de uma compreensão aprofundada da suscetibilidade às rupturas de taludes, permitindo a implementação

de medidas preventivas e corretivas que minimizem os riscos, garantam a segurança e a fluidez do tráfego.

2 USO DE VARIÁVEIS DO TERRENO NA AVALIAÇÃO DE SUSCETIBILIDADE

Nas últimas décadas foram desenvolvidos vários métodos para mapear, modelar, quantificar e identificar áreas suscetíveis a movimentos de massa. Não obstante, não existe uma metodologia consolidada e de ampla utilização para avaliação da suscetibilidade aos deslizamentos em escala de semidetalhe, mas uma análise prévia, de escala e disponibilidade de dados, de modo a permitir a escolha mais apropriada de critérios a serem empregados na análise (Martini et al., 2006).

Ao termo suscetibilidade também pode ser somado critérios para definição de perigo. Segundo a United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR, 2009), *suscetibilidade* refere-se às condições internas de um sistema físico ou ambiental que o tornam propenso a ser afetado por determinado evento, enquanto *perigo* é definido como a potencial ocorrência de um fenômeno natural ou antrópico capaz de causar danos ou perdas.

Ao se avaliar as metodologias apresentadas na definição de suscetibilidade ou perigo a movimentos de massa, principalmente em escala de semidetalhe ou maior, nota-se uma variada gama de metodologias de avaliação, que podem ser agrupadas em 4 grandes classes:

I. inventários e cadastramento de ocorrência, nos quais a análise se baseia numa correlação direta de uma unidade de análise com a contagem da ocorrência pretérita de eventos, como na metodologia adotada nas cartas de suscetibilidade na escala 1:25.000 de diversos municípios do Brasil disponíveis no repositório do Serviço Geológico do Brasil entre outros (Instituto de Pesquisas Tecnológicas [IPT], 2014; Yin & Yan, 1988);

II. análise determinística, ou modelos que determinam um único conjunto de resultados a partir de um conjunto de dados de entrada, exemplificados nos tipos de aplicações de *softwares* ou rotinas, como o modelo *Shalstab - Shallow Landslide Stability Analysis* (Dietrich & Montgomery, 1998);

III. análise estatística/matemática, na qual o modelo probabilístico é composto da chance prévia modificada por tantos fatores quantos forem os indicadores, onde se avalia a razão entre a probabilidade de ocorrer e a de não ocorrer, independentemente da consideração a qualquer

fator, mas sempre a partir de situações de amostras de ocorrência, com análises de regressões pesos de evidências e principalmente árvores de decisão (Debastiani et al., 2013; Riffel et al., 2016; Soares et al., 2002); e

IV. análise heurística, que é a classe de trabalhos que, a partir da análise de multifatores e a experiência dos profissionais, permite a determinação de pesos para a composição da suscetibilidade, como as *Analytic Hierarchy Process – AHP* (Bazzan & Reckziegel, 2024; Cerri et al., 2007; Faria & Augusto Filho, 2013; Vedovello et al., 2020).

Dias et al. (2021) apresentaram uma revisão dos modelos e variáveis temáticas analisadas em quase três dezenas de trabalhos prévios. Os autores listaram 60 variáveis temáticas de entrada que foram reunidas em seis agrupamentos temáticos: climático, geológico, geotécnico, hidrológico, de cobertura do solo e morfológico. A variável temática inclinação foi utilizada em aproximadamente 88% de todas as publicações, seguida de aspecto (45,5%), elevação (39,4%), coesão do solo (36,4%) e cobertura do solo (33,3%). A curvatura (27,3%), a curvatura do perfil (24,2%) e a curvatura planar (18,2%) também foram frequentemente utilizadas.

Dias et al. (2021) listaram também as variáveis temáticas relacionadas com fatores geomecânicos, que podem refletir a resistência interna ao cisalhamento. Nessa classe foi apresentada uma expressiva quantidade de trabalhos, muito provavelmente em decorrência da aplicação do modelo SHALSTAB, que foi o de maior frequência na revisão. Tiveram destaque variáveis como espessura do solo (24,2%), ângulo de atrito do solo (21,2%) e peso do solo (18,2%). Reichenbach et al. (2018), em sua revisão, concluíram que a declividade, seguida da litologia, aspecto, curvatura e cobertura do solo foram as variáveis temáticas mais utilizadas internacionalmente

Hoek e Bray (1981) apresentam as descontinuidades como responsáveis por condicionamento de expressiva quantidade de deslizamentos na análise da escala de campo. Contudo, ainda à luz da revisão sobre trabalhos de suscetibilidade apresentada por Dias et al. (2021), verifica-se que os fatores relacionados às descontinuidades pretéritas foram utilizados em poucos dos trabalhos relacionados, na forma de densidade de lineamentos estruturais e distância dos lineamentos, aparecendo em apenas 3% dos trabalhos avaliados.

Após a revisão das variáveis temáticas que compõem as análises de suscetibilidade e perigo de deslizamento em escalas de semidetalhe ou maior,

entende-se que uma importante fonte de informação, que relaciona a geometria das descontinuidades com as vertentes avaliadas, não é aplicada nas metodologias. A importância dessa variável pode ser avaliada ao se traçar um paralelo com as metodologias de análise cinemática em escala de detalhe, agregando conhecimentos da geologia estrutural, essenciais aos estudos geotécnicos em geral.

3 RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ESTABILIDADE ENTRE AS ESCALAS DE APLICAÇÃO

Para se obter uma representação em mesoescala (menores escalas), parte-se da análise de estabilidade de taludes em detalhe (mesoescala), avaliando o equilíbrio entre as forças de resistência e as forças instabilizadoras, de modo a se escolher os melhores indicadores das características desse equilíbrio para compor o modelo em menor escala.

O critério de ruptura de Mohr-Coulomb mostra que a tensão de resistência ao cisalhamento necessária para evitar a ruptura em descontinuidades já existente, varia em função da relação angular da inclinação da descontinuidade com o ângulo de atrito das paredes das descontinuidades, acrescido da coesão do preenchimento, quando ocorre. Para a situação de novas rupturas, sem controle estrutural, a coesão do maciço e o ângulo de atrito interno definem a tensão de resistência ao cisalhamento.

Os estudos baseados na análise determinística propõem extrapolações das variáveis de controle da estabilidade de escalas de detalhe para as de menor detalhe (Dias et al., 2021). Nessa comparação entre escalas é possível entender: i) como a geometria da encosta pode ser representada pela declividade, amplitude e aspecto (orientação de vertentes); ii) como a resistência interna ao cisalhamento pode se relacionar com a litologia, granulometria e composição mineralógica; iii) como as condições de saturação se relacionam com a pluviosidade, densidade de drenagens e distância de cursos de água; iv) como as descontinuidades pretéritas podem ser reativadas e condicionar deslizamentos, e como se relacionam com indicadores de escalas de menor detalhe como a densidade de lineamentos ou a distância entre o ponto avaliado e os lineamentos morfoestruturais cartografados; e v) como forma de avaliação final de predisposição, são avaliadas as análises de ocorrências pretéritas que devem apontar as correlações entre áreas com ocorrências e as classes das variáveis observadas.

Além dos métodos determinísticos que estabelecem variáveis para se atingir os resultados, podem ser citadas metodologias estatísticas e matemáticas (probabilísticas), como árvores de decisão e mineração de dados, que correlacionam múltiplas variáveis do terreno, com a ocorrência de movimentos pretéritos, ou, ao menos, análises de detalhe de perigos e riscos. Os terrenos com classes das variáveis mais favoráveis ao deslizamento devem acolher mais cadastros de eventos pretéritos, o que permite eleger as variáveis de maior interesse na previsão de ocorrência de eventos futuros.

A análise cinemática permite verificar a relação geométrica entre as descontinuidades estruturais, a direção de corte e a inclinação dos taludes, para avaliar a possibilidade de deslizamento, empregando

como critério o ângulo de atrito (Hoek & Bray, 1981). Dessa forma, a análise cinemática se mostra como uma ferramenta para avaliação preliminar de estabilidade e permite identificar locais potenciais de ruptura apenas com base no comportamento geométrico das descontinuidades e do talude, bem como do ângulo de atrito das descontinuidades, a partir do uso das suas projeções em estereograma (Fernandez et al., 2015). O padrão de distribuição dos pólos das medidas planares das descontinuidades em estereogramas permite identificar os tipos de rupturas que podem ou não ocorrer num cenário específico (Hasui, 2020).

Para as análises cinemáticas, Hoek e Bray (1981) definem as rupturas em planares, em cunha e tombamentos, e as condições para que estas ocorram (Quadro 1).

QUADRO 1 – Principais tipos de ruptura e critérios para ruptura de acordo com a geometria das descontinuidades em maciços rochosos.

BOX 1 – Main types of failure and criteria for failure based on the geometry of discontinuities in rock masses.

<i>Ruptura Planar</i>	<i>Ruptura em Cunha</i>	<i>Tombamento de blocos (flexural ou direto)</i>
<p>Critério 1 Direção da descontinuidade apresenta até 10° de diferença para cada lado do talude;</p> <p>Critério 2 Descontinuidade apresenta mergulho menor que o do talude;</p> <p>Critério 3 Mergulho da descontinuidade maior que o ângulo de atrito;</p>	<p>Critério 1 Sentido da linha de intersecção de dois planos de descontinuidade com até 10° para cada lado do sentido da vertente;</p> <p>Critério 2 Mergulho da linha de intersecção é menor do que a inclinação do talude;</p> <p>Critério 3 Mergulho da linha de intersecção é maior do que o ângulo de atrito;</p>	<p>Critério 1 Direção da descontinuidade apresenta até 20° de diferença com a direção do talude;</p> <p>Critério 2 Mergulho elevado da descontinuidade para dentro do talude;</p> <p>Critério 3 – apenas para o tipo direto Presença de descontinuidade ortogonal ao plano de tombamento com mergulho menor que a inclinação do talude e do ângulo de atrito.</p>

Fonte: Modificado de Norrish e Wyllie (1996) e Fernandez et al. (2015).

4 METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A RUPTURAS A PARTIR DE LINEAMENTOS

A metodologia empregada para a definição da suscetibilidade a rupturas por fraturas está resumida no fluxograma da Figura 1, que envolve os passos principais: i) obtenção dos lineamentos de isobase e a devida comparação com bases da geologia estrutural local; ii) obtenção de planos de informação com a densidade de lineamentos separados em classes direcionais amostrados com resolução espacial 750 e 1000 m; iii) análise para segmentação e classificação direcional das rodovias; iv) comparação entre as bases de segmento de rodovia, com as densidades direcionais da rodovia, avaliando o atendimento dos critérios de ruptura de Hoek e Bray (1981).

Lineamentos morfoestruturais são feições retilíneas no relevo, e no caso de relevos acidentados, com vertentes de declividades variadas, para que a sua projeção em superfície seja retilínea, devem necessariamente representar estruturas verticalizadas, e por isso entendidas na mesoescala por fraturas de alto ângulo de mergulho; quando associadas às zonas de cisalhamento, representam fraturas com

mergulhos para ambas as direções perpendiculares à direção do lineamento.

A proposta do artigo está relacionada à suscetibilidade de ruptura de taludes por fraturas em regimes rúpteis, e, nesse sentido, as discontinuidades de foliação e xistosidade, relacionadas aos regimes dúcteis-rúpteis, não foram diretamente abordadas na metodologia, embora pondere-se que na área de estudo existam famílias estruturais de fraturas paralelas às foliações. As variações de mergulho comuns nas foliações e xistosidades (excetuando as foliações miloníticas), não permitem uma correta avaliação na metodologia, exceto as de alto mergulho.

Um fator importante a ser considerado na aplicação desta metodologia às foliações, é a utilização dos lineamentos morfoestruturais relacionados às isobases, que não representam estruturas relacionadas às foliações, que são condicionantes mais antigas do arcabouço, exceto quando a evolução da tectônica rúptil apresenta fraturas paralelas às foliações ocorridas em deformações mais recentes, como durante a abertura do Oceano Atlântico no Cretáceo e nas deformações miocênicas do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil. Ou seja, na metodologia proposta,

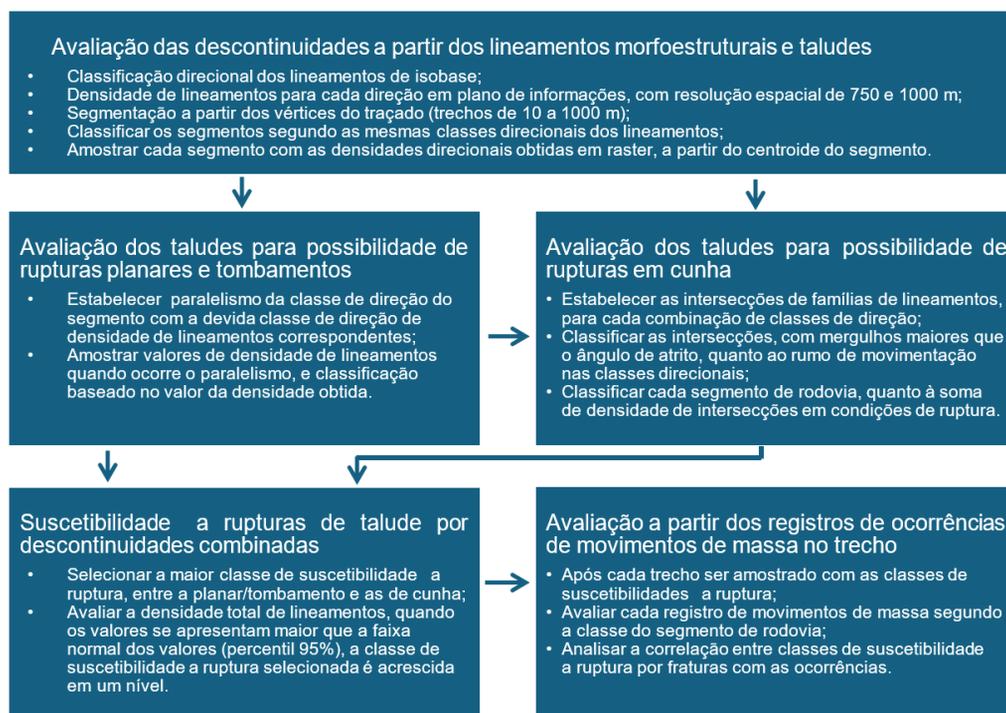


FIGURA 1 – Fluxograma da metodologia de avaliação de suscetibilidade de rupturas de taludes por fraturas a partir de análise estrutural e de lineamentos morfoestruturais.

FIGURE 1 – Flowchart of the methodology for assessing slope failure susceptibility due to fractures, based on structural analysis and morphostructural lineaments.

apenas serão avaliadas descontinuidades de foliação que estejam superpostas por deformações rúpteis mais recentes com influência nas superfícies de base.

4.1 Avaliação das descontinuidades a partir dos lineamentos morfoestruturais e taludes

A integração de dados estruturais obtidos em escalas distintas, como os lineamentos de isobase, regionais e estaduais até fraturas observadas em campo, permite reconstruir a evolução rúptil e reduzir incertezas geológicas em ambientes onde dados de alta resolução são escassos. Essa abordagem favorece a modelagem preditiva do comportamento estrutural, subsidiando decisões em engenharia, geologia ambiental e projetos em profundidade como fraturamento hidráulico e armazenamento geológico (Alves, 2025).

Além disso, a observação de padrões fractais no fraturamento indica que estruturas em diferentes escalas podem estar geneticamente associadas, sendo possível inferir a geometria e a orientação de fraturas menores a partir da análise de lineamentos maiores. Modelos como o de Riedel reforçam esse entendimento, fornecendo uma base conceitual para interpretar a distribuição e evolução das zonas de cisalhamento.

Neste sentido, a caracterização da tectônica rúptil empregada neste trabalho tem como base o estudo de Alves (2025), apontando que quanto melhor a discretização das informações nas correlações entre a macroescala e a mesoescala, melhor o resultado. Esse modelo preditivo norteia a metodologia utilizada para identificar as condicionantes baseadas nas descontinuidades em áreas propensas a deslizamentos.

A base de dados de lineamentos morfoestruturais foi construída a partir da compilação de dados de:

a) lineamentos de ampla continuidade no Estado de São Paulo, designados de lineamentos de expressão estadual, na área de estudo se destacam as zonas de cisalhamento de Cubatão, Bairro Alto, Juquiá-Mogi das Cruzes e Camburu-Caraguatatuba;

b) lineamentos morfoestruturais de expressão regional e local, extraídos de modelos digitais de elevação (MDE), em diferentes escalas;

c) lineamentos morfoestruturais delineados a partir de mapas de isobases (Golts & Rosenthal, 1993; Grohmann et al., 2011); e

d) compilação de dados de fraturas disponíveis na literatura.

Alves (2025), com base na compartimentação de dados de lineamentos em unidades espaciais definidas segundo critérios geológicos e geomorfológicos (Alves, 2025; Cardoso et al., 2009; Ferreira & Rossini-Penteado, 2011; Vedovello, 2000; Vedovello et al., 2020), apresentou diretrizes e boas práticas para a condução de estudos comparativos entre bases de dados de lineamentos morfoestruturais e fraturas, obtidas por meio de compilação cartográfica e levantamentos estruturais de campo. Entre essas diretrizes, destaca-se a adoção de unidades de análise de pequena dimensão em relação à extensão dos lineamentos, bem como o uso de metodologias baseadas em imagens raster, que favorecem maior correlação entre os lineamentos morfoestruturais e os dados estruturais em mesoescala.

Os lineamentos morfoestruturais de isobases e os segmentos de rodovia foram classificados em oito classes direcionais (N-S, NNE-SSW, NE-SW, ENE-WSW, E-W, WNW-ESE, NW-SE e NNE-SSE), separadas por intervalos de $22,5^\circ$. Uma dada direção deve compor 2 intervalos, um para cada sentido. Como exemplo, a classe de direção E-W deve compor um intervalo dos azimutes leste e outro oeste, cada um com $22,5^\circ$. Com base nos lineamentos de isobase devidamente classificados nas direções listadas, foi calculado, no modo *raster*, a densidade direcional de lineamentos de isobase, a partir da soma do comprimento de lineamento em cada direção dentro do pixel de resolução selecionado, resultando em 8 mapas de densidade direcional de lineamentos que podem ser expressos em m/m^2 .

A análise foi realizada com dados no modo *raster*, com resoluções de 750 m e 1000 m. Para isso, foram utilizadas no QGIS ferramentas que decompõem o lineamento em pontos (com espaçamento de 200 m), e cada pixel teve um ajuste de raio de captura para a mesma resolução do pixel, o resultado amostrado em cada pixel é uma quantidade de pontos que representam uma classe direcional, que permite a medida da densidade de lineamentos. Ausência de pontos, entende-se não ocorrer lineamento; valores maiores que zero e menores que 1, são efeitos do raio de amostragem, e representam uma possibilidade de ocorrer o lineamento (com valores menores que 200 m de lineamento); valores superiores a 1, entende-se ocorrer lineamento no pixel; e valores múltiplos mostram uma maior representação dos lineamentos no pixel, como referência cada ponto acima de 1 equivale a 200 m de lineamento no pixel (valor do espaçamento adotado para a operação).

A sinuosidade das rodovias exigiu uma abordagem com certo detalhe, baseada na necessidade de ser expressa a individualidade dos lineamentos de isobase para a devida correlação com descontinuidades de campo. Os trechos de rodovias obtidos no QGIS a partir da segmentação pelos vértices dos vetores deste plano de informação, representam trechos de 10 a 1000 m de comprimento. Os segmentos de rodovia foram também classificados em 8 classes direcionais, coincidentes com as classes dos lineamentos morfoestruturais, para fins de análise comparativa.

A partir dos planos de informações dos segmentos de rodovia e do raster da densidade de lineamentos classificados pelas direções, foram realizados cálculos baseados nas comparações entre a atitude das estruturas atribuídas a cada direção de lineamento, com os critérios de ruptura do Quadro 1. Para os mecanismos de ruptura planar e tombamento, foi avaliado o paralelismo entre os lineamentos e os segmentos da rodovia, classificando-se a intensidade da suscetibilidade com base nos valores de densidade. Para os casos de ruptura em cunha, combinou-se o cruzamento de duas classes direcionais de lineamentos, de forma a avaliar a coincidência do rumo da interseção entre famílias estruturais com a direção perpendicular a cada segmento de rodovia. Nessa abordagem, o valor do produto entre as densidades das duas direções foi utilizado como indicador da suscetibilidade à ruptura em cunha.

4.2 Avaliação dos taludes para rupturas planares e tombamentos

Um ponto relevante a ser considerado é o fato de que os maciços rochosos na área estudada são recobertos por solos de alteração, que por vezes herdaram em seu arcabouço a suscetibilidade de rupturas por fraturas preexistentes. As descontinuidades estruturais consideradas compreendem fraturas, e, de maneira secundária, foliações, quando apresentam abertura entre os planos. Para a análise das descontinuidades é necessário que haja uma base de dados robusta, preferencialmente com dados de campo, que possam relacionar a atitude das estruturas com as informações extraídas do relevo, como as direções de lineamentos morfoestruturais. Ou seja, para a aplicação dos diferentes processamentos em SIG, é necessário caracterizar o terreno como uma unidade de análise em uma relação matricial contínua (*raster*), de maneira que para toda a área exista uma cobertura com as informações das características das estruturas geológicas.

O critério 1 para análise cinemática das rupturas planares e os tombamentos de blocos é o paralelismo entre a descontinuidade e a parede do talude (Quadro 1), de maneira que a direção de mergulho do talude deve estar a mais ou menos 10° da direção do mergulho das descontinuidades. A direção perpendicular aos segmentos de rodovia deve estar a mais ou menos 10° da direção do mergulho das famílias de descontinuidades, representadas pela direção dos lineamentos. A orientação de cada classe direcional dos segmentos de rodovias foi comparada com a classe direcional dos lineamentos. Se coincidentes, o critério 1 do paralelismo foi atendido.

Para o Critério 2 de rupturas planares, no qual a descontinuidade deve apresentar mergulho menor que o do talude (Quadro 1), a avaliação foi realizada com foco nos taludes de corte de alto ângulo de mergulho, por esta razão, considera-se o critério como atendido, por não ser possível avaliar qual dos altos mergulhos se sobressai. Contudo, é importante salientar que em avaliações de encostas naturais e/ou taludes abatidos, as descontinuidades não podem ser de alto ângulo de mergulho para atender os critérios das rupturas planares; porém, neste caso, o critério de tombamentos de blocos continua a ser atendido e a suscetibilidade avaliada em conjunto como planar e tombamento permanece válida.

Para o Critério 3 de rupturas planares, no qual o mergulho da descontinuidade é maior que o ângulo de atrito (Quadro 1), novamente o caráter de mergulhos de alto ângulo das descontinuidades relacionadas aos lineamentos morfoestruturais permite que o critério não necessite de avaliação, uma vez que a sua inclinação sempre será maior que os ângulos de atrito das rochas que compõem a área de estudo, que variam normalmente de 22° (para os solos de alteração) a 35° para granitos e gnaisses (Hoek & Bray, 1981).

Norrish e Wyllie (1996) apontam que o critério 2, para tombamentos de blocos diretos e flexurais, e o critério 3, apenas para tombamentos diretos (Hartwig & Pinheiro, 2022) (Quadro 1), assumem posição diferente do processo planar. O critério 2 requer descontinuidades de alto ângulo de mergulho no sentido do maciço, enquanto no critério 3, é necessário que ocorra uma segunda descontinuidade paralela ao talude, em sentido favorável ao deslizamento e com ângulos de mergulho menores do que o ângulo de atrito da descontinuidade. As descontinuidades de campo apresentam mergulho médio de 70° para as duas vertentes. Por este motivo e por premissa do método, toda vez que o critério 1 for atendido, o critério 2 também será atendido. O critério

3 é atendido em função da distribuição homogênea das fraturas de alívio de tensão ocorrer no mesmo sentido da vertente, porém com mergulhos menores do que o ângulo de atrito.

Para a aproximação pretendida nesta avaliação de possibilidade de ruptura para análise de suscetibilidade, apenas os critérios 1 de ambos os tipos de rupturas exigem o paralelismo entre as classes direcionais de lineamentos e os segmentos de rodovias (taludes), uma vez que os critérios 2 e 3 são considerados atendidos. Quando o critério de paralelismo é atendido, a análise se baseia no valor absoluto da densidade direcional dos lineamentos.

Dessa forma, os trechos das rodovias foram classificados da seguinte maneira: a) densidade maior que 1, referido como classe de suscetibilidade elevada, uma vez que pelo método de amostragem dos lineamentos por pixel o valor 1 define que o acumulado é de probabilidade de 100% para ocorrência de lineamento nas proximidades; b) densidade entre 0 e 1, referida como classe de suscetibilidade média, que representa uma fração da probabilidade de ocorrer o lineamento no local avaliado; e c) densidade igual a 0, ou classe de suscetibilidade baixa. Devido à natureza da predição de comportamentos, entende-se que mesmo quando determinado pixel indique que nenhum lineamento foi obtido no raio de amostragem do pixel, ainda assim, o maciço rochoso pode apresentar discontinuidades, como foliações ou fraturas esparsas.

A partir do procedimento descrito, cada segmento avaliado da rodovia foi devidamente classificado para a suscetibilidade de rupturas planares e tombamento, e os segmentos lindeiros de mesma classificação podem compor compartimentos homogêneos quanto à suscetibilidade.

4.3 Avaliação dos taludes para rupturas em cunha

Na análise de rupturas em cunha, nas quais ao menos duas famílias de fraturas delimitam um bloco de rocha em cunha, foram avaliadas as linhas de intersecções entre as diversas famílias, conforme os critérios apresentados no Quadro 1. O objetivo foi identificar quais combinações poderiam ser formadas dentro de cada uma das 8 classes direcionais. Nesse contexto, as inclinações e os quadrantes de mergulho das famílias estruturais desempenharam um papel crucial na definição das intersecções. O sentido de movimento dos blocos foi utilizado para a verificação do critério 1, relacionado ao paralelismo entre o sentido do movimento da cunha (definido pela inclinação da linha de intersecção entre as famílias de fraturas envolvidas na cunha) e a

vertente do talude, enquanto para a verificação do critério 2, os mergulhos das intersecções das famílias estruturais precisam ser comparados com o ângulo de atrito das discontinuidades, que pode variar significativamente em função do tipo de rocha, alteração química das paredes das estruturas, preenchimentos entre outros, variando entre 25 e 35° (Hoek & Bray, 1981).

A partir da definição de todas as direções possíveis de ruptura, foram selecionadas as direções ortogonais a cada segmento de rodovia. Essas direções representam as possibilidades de ruptura para os segmentos analisados. Para cada linha de intersecção que forma uma cunha selecionada, as suas densidades direcionais de lineamentos foram multiplicadas aos pares, resultando em um valor de densidade das intersecções.

Para cada segmento de rodovia analisado são possíveis várias combinações de discontinuidades que configuram blocos (cunhas), passíveis de causar rupturas. Para cada classe direcional de segmento foram somadas todas as densidades de intersecções na direção ortogonal da rodovia (critério 1) e cada direção de movimentação de cunha obteve uma densidade de intersecção resultante.

Os valores resultantes de densidade de intersecção de discontinuidades foram utilizados para classificar o segmento da rodovia quanto à suscetibilidade e ruptura por cunhas em alta, média e baixa:

- classe de suscetibilidade alta - os valores resultantes da soma das densidades de intersecção na direção ortogonal do segmento da rodovia foram superiores a 1, que indicam que o acumulado de probabilidade sugere uma alta chance de que ocorra a intersecção de duas famílias de discontinuidades (representada pelo lineamento) no segmento analisado; essa situação reflete uma intersecção significativa entre as famílias de lineamentos analisadas;
- classe de suscetibilidade média - apresenta valores resultantes de densidade de intersecções entre 0 e 1; esta classe representa áreas onde duas famílias de discontinuidades (representados por lineamentos) estão presentes, mas se encontram dentro da distância de influência do lineamento no maciço rochoso, resultando num acumulado de probabilidade menor que 1 (100%);
- classe de suscetibilidade baixa - a densidade de intersecções apresenta valores somados igual a zero; esta classe ocorre quando a influência da distância de um dos lineamentos não permitiu a captura da feição durante o processo de amostragem nos *pixels*, mas ainda é possível que indivíduos pertencentes a uma família de discontinuidades estejam pre-

sentes, com ocorrência esparsa ou difusa, e com baixa probabilidade de formar interseções significativas entre as famílias.

4.4 Suscetibilidade a rupturas de talude por descontinuidades combinadas

Com base na classificação das 3 tipologias de ruptura, em dois grupos de avaliação apresentados (rupturas planares/tombamento e rupturas em cunha) foi desenvolvida uma combinação final que preserva, em cada segmento, a classe de suscetibilidade mais elevada entre os dois tipos de rupturas.

As descontinuidades no maciço podem causar cominuição das rochas, aumento da porosidade secundária, percolação de água, e intemperismo nos maciços. Essas características podem acarretar efeitos diretos nas propriedades geomecânicas das rochas, com redução na resistência ao cisalhamento dos maciços. Assim, a densidade total das descontinuidades pode fragilizar o maciço rochoso e causar outros processos de ruptura; mesmo nos locais onde

as famílias de descontinuidades não causam as rupturas pelos processos descritos (planar, tombamento e cunha), ainda pode ser esperado processos de desprendimento de blocos e até rupturas rotacionais devido a cominuição do maciço.

Realizou-se a soma das classes direcionais de densidade de lineamentos de cada *pixel*, de modo a considerar essa densidade total das descontinuidades na determinação da suscetibilidade. Contudo, o valor da densidade total utilizado foi obtido diretamente da soma das densidades direcionais amostradas em cada segmento de rodovia, e não o obtido a partir das figuras 2 e 3, que estão apresentadas para avaliar a distribuição da densidade em toda a área, e não apenas nas rodovias. Esse valor de densidade total, amostrado nos segmentos de rodovia, foi classificado em densidade total relevante, quando o valor do segmento excede o intervalo considerado normal. Para os dados amostrados, o histograma de distribuição dos valores de densidade total se apresenta em distribuição não-paramétrica, cujo modelo de identificação de anomalias positivas mais indicado é

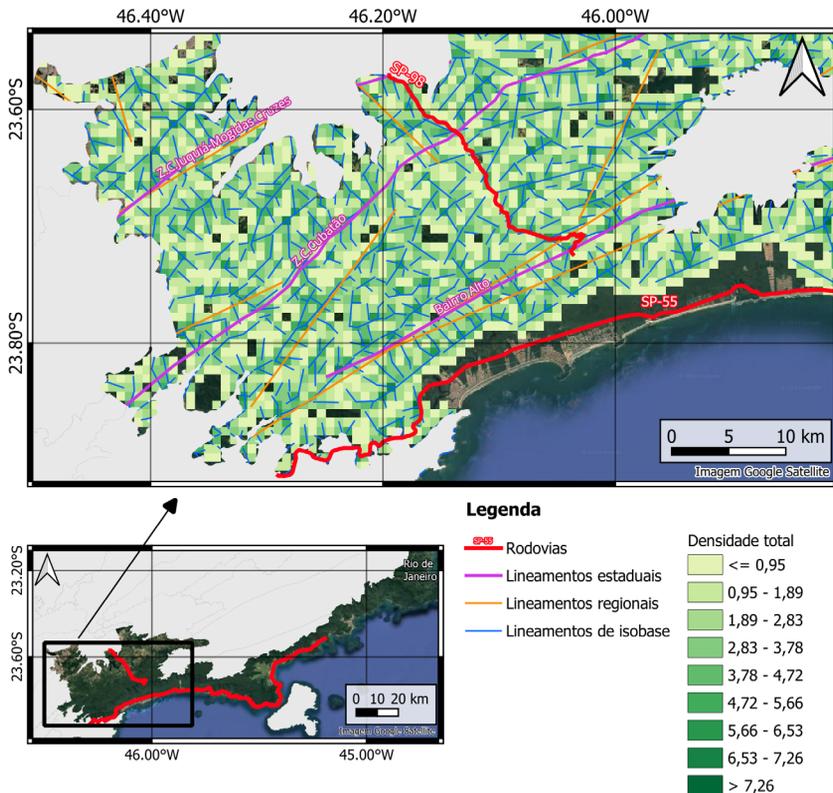


FIGURA 2 – Mapa de densidade de lineamentos morfoestruturais obtidos de superfícies de base para as rodovias SP-98 e trecho Santos-Bertioga da SP-55.

FIGURE 2 – Density map of morphostructural lineaments derived from isobase surfaces for the SP-98 highway and the Santos-Bertioga segment of SP-55.

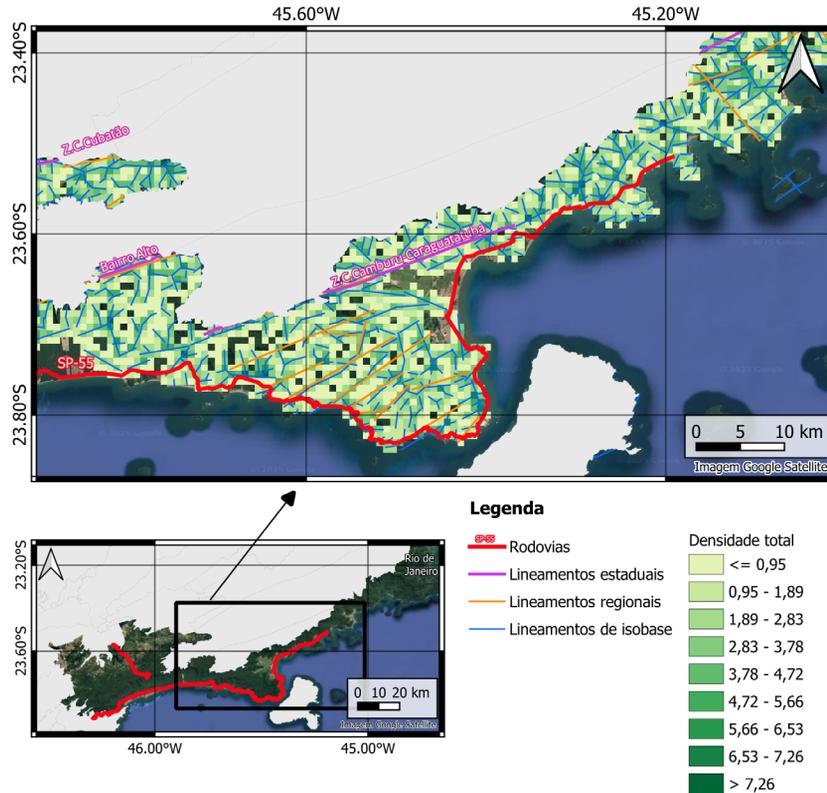


FIGURA 3 – Mapa de densidade de lineamentos morfoestruturais obtidos de superfícies de base para a rodovia SP-55 no trecho São Sebastião a Ubatuba.

FIGURE 3 – Density map of morphostructural lineaments derived from base surfaces for the SP-55 highway segment between São Sebastião and Ubatuba.

percentil 95%, nesse caso o valor de 11,7 e 10,2 pontos por pixel na resolução 750 m para a SP-55 e SP-98 respectivamente, e 15,7 e 15,0 na resolução de pixel de 1000 m, respectivamente para a SP-55 e SP-98. Para os segmentos de rodovia com densidades relevantes, a suscetibilidade foi aumentada em uma classe, ajustando as classes de suscetibilidade baixa para média, e a média para alta. Esse critério foi denominado suscetibilidade combinada de rupturas por fraturas, representando uma abordagem mais refinada para a análise.

4.5 Avaliação a partir dos registros de ocorrências de movimentos de massa no trecho da rodovia

Fernandez et al. (2022) organizaram os dados de 9.285 registros de eventos geodinâmicos (escorregamentos, quedas de blocos, erosões e inundações), dos quais 8.224 ocorridos entre 1993 e 2019 nos municípios da área de estudo. Os dados provêm dos projetos de cadastramento de eventos e de mapeamentos de risco realizados sob a supervisão técnica do atual Instituto de Pesquisas Ambientais

do Estado de São Paulo (Instituto Geológico [IG], 2017, 2020).

Dados específicos das rodovias SP-055 e SP-098 compreendem 224 registros de eventos geodinâmicos ocorridos entre 2002 e 2020. Esses registros foram disponibilizados pelas sedes das divisões regionais do Departamento de Estradas e Rodovias do Estado de São Paulo (DER-SP). Somaram-se ainda os 837 registros e informações oriundos do Sistema de Gestão de Atendimento (SIGA) e do Sistema de Acidentes de Transporte (SAT), ambos do DER-SP, sobre acidentes de trânsito em períodos de chuva intensa, entre 2018 e 2020.

Os registros de eventos geológicos, foram sistematizados e organizados em um banco de dados. A partir deste banco, foram selecionados apenas aqueles que permitiram maior correlação entre os dados pluviométricos disponíveis e sua influência nas faixas de domínio das rodovias. Importante destacar que os registros dos eventos foram realizados por técnicos do DER-SP e não puderam ser classificados quanto a tipologia (Varnes, 1978) e nem tampouco

foi possível avaliar as ocorrências durante as atividades desse trabalho, uma vez que escorregamentos mais antigos, em geral, tiveram sua massa mobilizada limpa, os taludes foram regularizados e revegetados, ou sofreram uma intervenção geotécnica.

Desta forma, foram estabelecidos critérios de seleção e validação de dados, visando estabelecer correlações bem definidas entre a incidência de chuvas e a ocorrência de escorregamentos. Os registros selecionados apresentam localização definida e próxima às rodovias, a sua descrição condizente com eventos de escorregamento, com indicação da data e hora de ocorrência. Após essa etapa, foram excluídos os registros duplicados de um mesmo evento.

Como resultado deste processo, foram selecionados 281 registros de eventos de escorregamento no período de 1993 a 2020, associados às rodovias SP-055 e SP-098 (Figura 4).

5 RESULTADOS

Alves (2025) correlacionou dados estruturais (falhas e juntas) obtidas em escala de detalhe com os lineamentos morfoestruturais e demonstrou que existe boa correspondência entre os lineamentos regionais obtidos a partir de análise morfométrica e do MDE, com os lineamentos obtidos por análises de isobases em escala de semidetalle. O arranjo geométrico dos lineamentos morfoestruturais foi avaliado à luz do modelo de Riedel (1929) e do modelo de evolução de zonas de cisalhamento de Tchalenko e Ambraseys (1970). As figuras 5 e 6 apresentam a posição das rodovias e a roseta dos lineamentos de cada unidade de análise, as grandes zonas de cisa-

lhamento e lineamentos de expressões estadual, regional e isobase.

As famílias de estruturas analisadas apresentam padrão consistente com os lineamentos de isobase. Essas estruturas apresentam atitudes com mergulho elevado (cerca de 70°), variando para os dois lados da vertente, exceto pelas direções E-W a ENE-WSW, que apresentam mergulhos de até 50° , por vezes sobrepostos à atitude da foliação. Foi destacada também a influência de fraturas mais recentes na conformação do relevo, sendo estas de maior destaque que as foliações em algumas litologias. No estereograma da Figura 7 pode-se observar o comportamento das fraturas e a presença de juntas de alívio de tensão, com atitude predominantemente NE-SW, com baixos ângulos de mergulho. As juntas de alívio de carga descritas por Almeida e Carneiro (1998), acompanham a direção principal das vertentes na maior parte das encostas das rodovias em análise, como descrito por Hartwig (2006, pg. 84), que apontou que a direção das juntas de alívio na região da Serra do Órgãos segue a orientação das vertentes (mapa do aspecto do relevo).

A análise estrutural rúptil regional revelou que todas as classes de direções apresentam características predominantemente subverticais, com concentrações de mergulho em torno de 70° em ambos os sentidos. Exceções foram na direção E-W (com pouca dispersão para as direções ENE-WSW e WNW-ESE), que coincide com falhas normais, com mergulhos de até 57° para norte (mergulho adotado) e 70° para sul (Figura 8). Essa direção também se relaciona às foliações com mergulhos variados, mas com atitude média dos pólos em

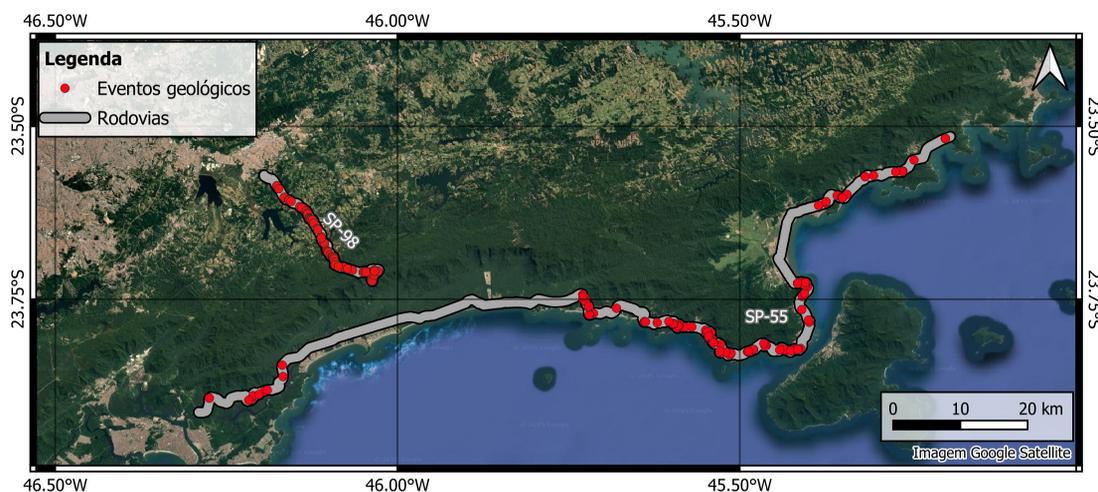


FIGURA 4 – Localização dos trechos das rodovias e dos eventos geológicos ocorridos entre 1993-2021.

FIGURE 4 – Location of highway segments and geological events that occurred between 1993 and 2021.

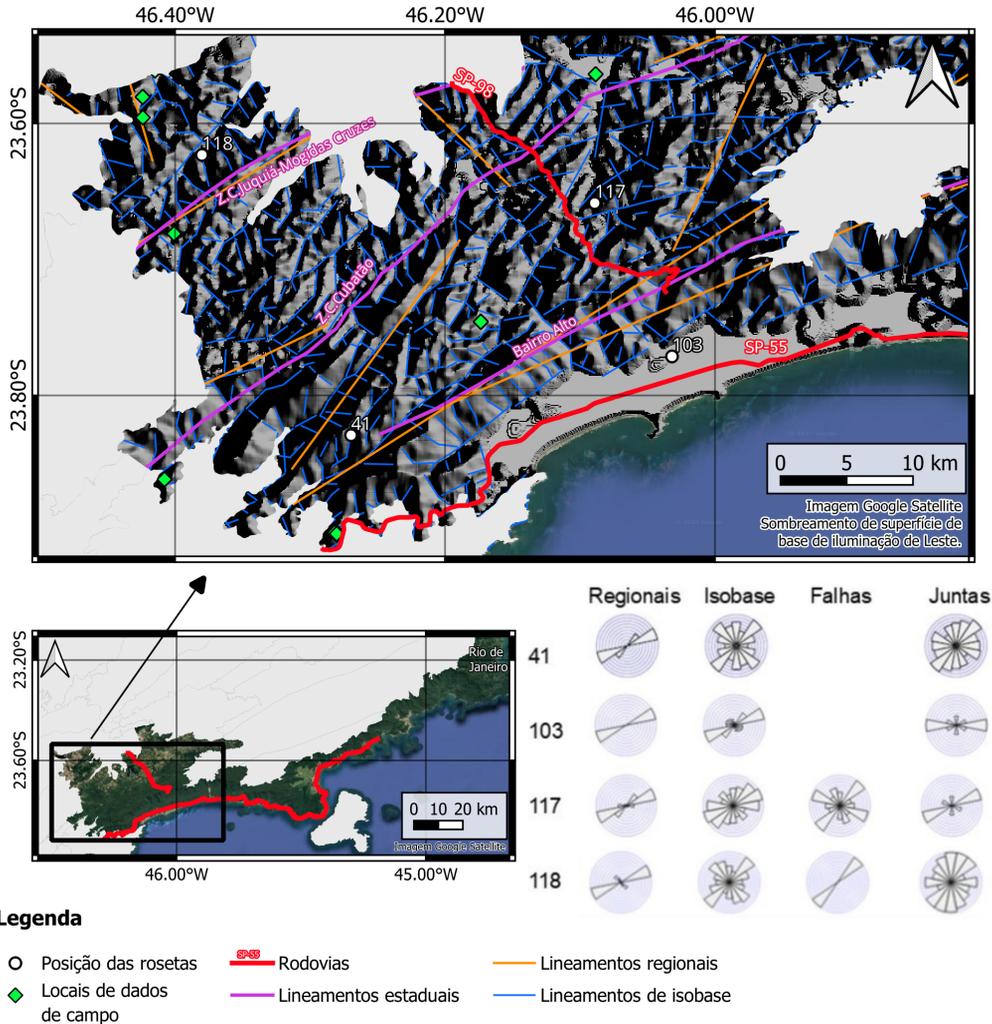


FIGURA 5 – A rodovia SP-98 e o trecho Santos-Bertioga da SP-55 no contexto dos lineamentos morfoestruturais e discontinuidades medidas diretamente no campo. Os diagramas de roseta ilustram a tendência direcional das estruturas em uma determinada porção do terreno, a partir dos dados coletados. No presente caso, os lineamentos regionais apresentam orientação predominante ENE–WSW, enquanto os lineamentos de isobase concentram-se majoritariamente nas direções NE–SW, com ocorrência secundária de NW–SE. Os dados de campo indicam falhas alinhadas aos lineamentos de isobase e juntas com ampla dispersão, embora com concentração principal no quadrante NE–SW.

FIGURE 5 – The SP-98 highway and the Santos-Bertioga segment of the SP-55 within the context of morphostructural lineaments and discontinuities directly measured in the field. The rose diagrams illustrate the directional trends of structures in a given portion of the terrain, based on the collected data. In this case, the regional lineaments display a predominant ENE–WSW orientation, whereas the isobase lineaments are mainly concentrated in the NE–SW directions, with a secondary occurrence in the NW–SE trend. Field data indicate faults aligned with the isobase lineaments and joints exhibiting wide dispersion, although predominantly concentrated in the NE–SW quadrant.

torno de 169/55, válidos para as litologias da área, que incluem granitos foliados, gnaisses e metassedimentos que apresentam foliações, e ainda granitos não-orientados.

A Figura 8 apresenta um estereograma que ilustra as combinações entre famílias e as respectivas interseções. A Tabela 1 detalha, para cada direção de movimentação da cunha, todas as combi-

nações possíveis de interseção entre as famílias de lineamentos.

Todas as interseções apontaram mergulhos iguais ou inferiores a 70°, validando assim o critério 2 de rupturas por cunha, uma vez que a metodologia envolve uma previsão de rupturas em taludes de corte com alto ângulo, de maneira semelhante aos processos planares e tombamento. Quanto ao crité-

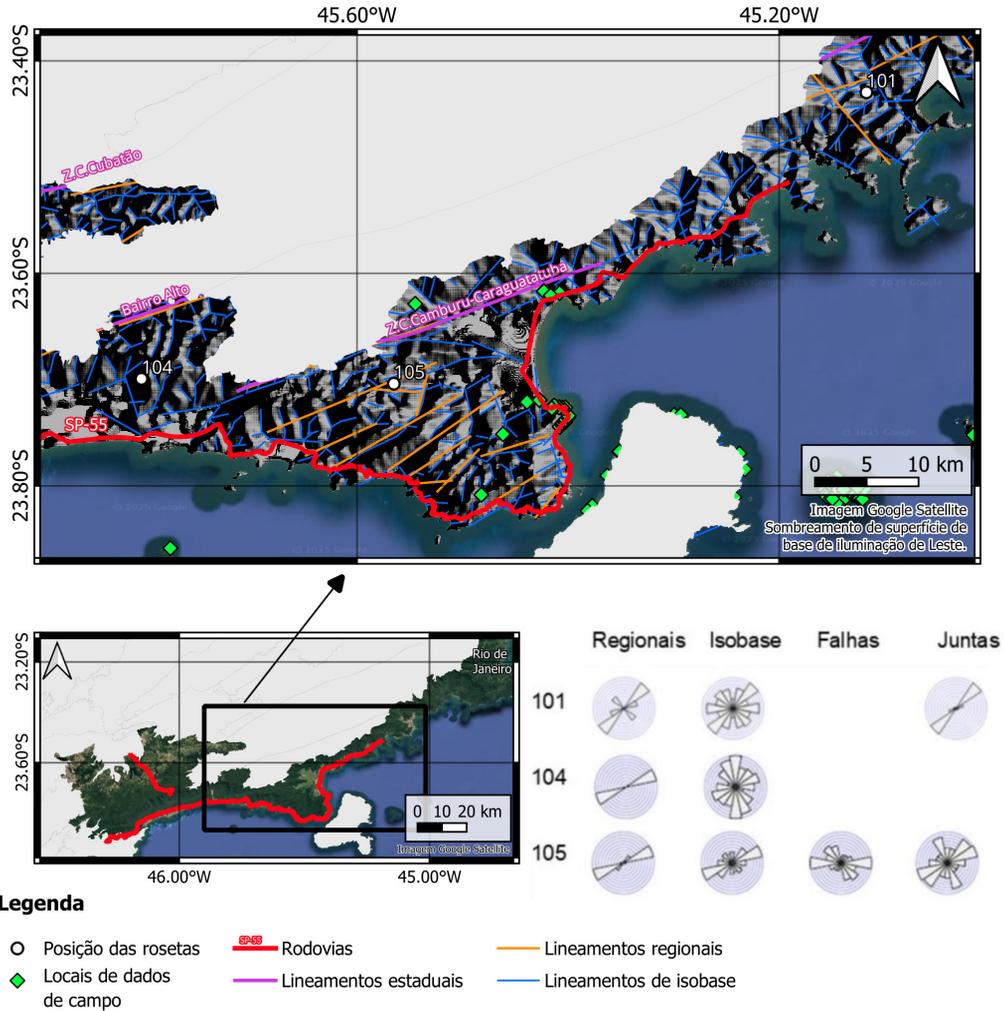


FIGURA 6 – Rodovia SP-55 no trecho São Sebastião a Ubatuba no contexto dos lineamentos morfoestruturais e descontinuidades medidas diretamente no campo. Os diagramas de rosetas apontam os lineamentos regionais com orientação predominante ENE–WSW, enquanto os lineamentos de isobase concentram-se majoritariamente nas direções NE–SW, com ocorrência secundária de N–S. Os dados de campo indicam falhas E–W e juntas NE–SW e NW–SE.

FIGURE 6 – SP-55 Highway segment from São Sebastião to Ubatuba within the context of morfostructural lineaments and discontinuities directly measured in the field. The rose diagrams indicate that the regional lineaments have a predominant ENE–WSW orientation, whereas the isobase lineaments are mainly concentrated in the NE–SW directions, with a secondary occurrence in the N–S trend. Field data reveal E–W-oriented faults and joints trending NE–SW and NW–SE.

rio 3, todas as intersecções com ângulo de mergulho menor que o ângulo de atrito foram descartadas.

O mapa da Figura 9 apresenta os segmentos da Rodovia SP-55, no Município de São Sebastião, classificados pela suscetibilidade de ruptura de taludes por fraturas calculadas a partir da densidade de lineamentos obtidas com tamanho de pixel (resolução) de 750 e 1000 m. A Figura 10 apresenta a classificação da suscetibilidade da Rodovia SP-98, entre Mogi das Cruzes e o final do trecho de serra (km 92) no município de Bertioiga, nas duas resoluções adotadas.

Para fins de validação, cada uma das 281 ocorrências de movimentos de massa (Fernandez et al., 2022) foi classificada a partir da suscetibilidade à ruptura calculada a partir dos segmentos rodoviários (Figuras 9 e 10). O esperado é que as ocorrências de movimentos de massa estejam acumuladas nas classes de suscetibilidade alta, e sejam pouco frequentes nas classes de suscetibilidade baixa. As figuras 11 e 12 ilustram a classificação da suscetibilidade das ocorrências de movimentos de massa a partir da densidade de lineamentos na resolução espacial de 750 e 1000 m, no trecho da SP-55

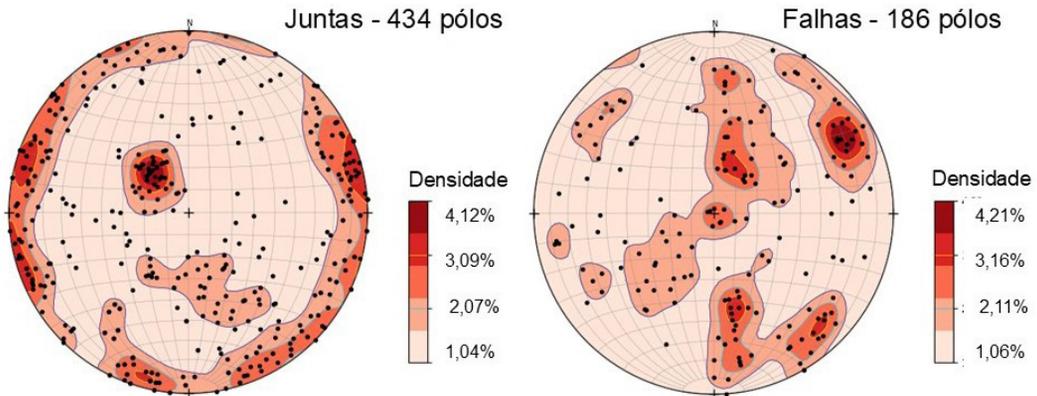


FIGURA 7 – Estereograma das falhas e juntas da área correspondente às figuras 5 e 6, compiladas no banco de dados de fraturas (Alves, 2025), com medidas obtidas de diversos trabalhos acadêmicos e técnicos (Diagrama de Schmidt, hemisfério inferior).

FIGURE 7 – Stereonogram of faults and joints in the area corresponding to figures 5 and 6, compiled in the fracture database (Alves, 2025), with measurements obtained from various academic and technical studies (Schmidt diagram, lower hemisphere).

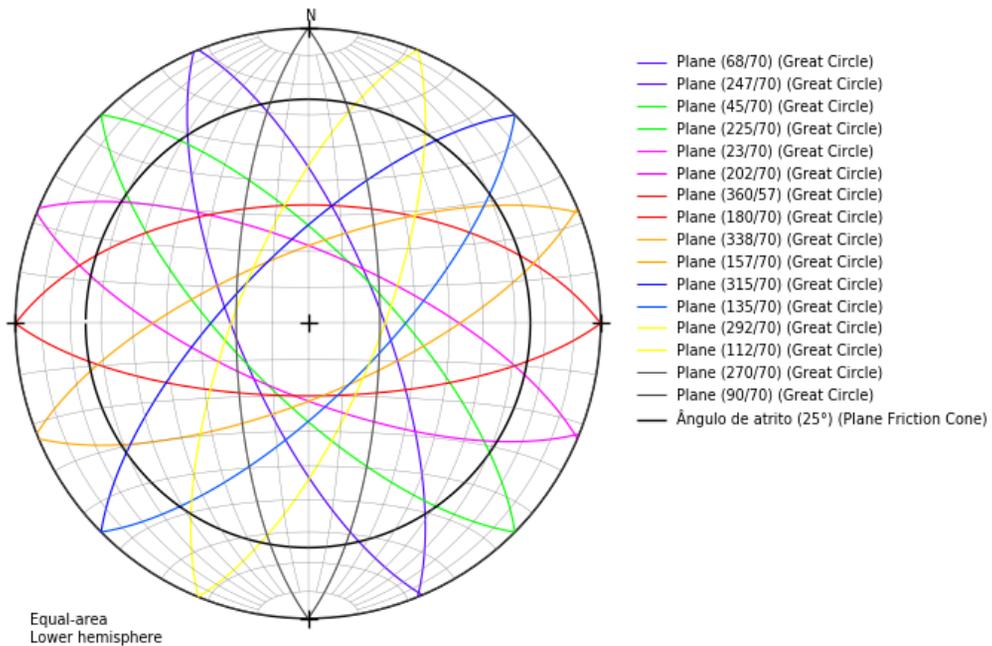


FIGURA 8 – Direção das intersecções de cada dupla da atitude de cada família de juntas, considerando os mergulhos médios.

FIGURE 8 – Direction of the intersections for each pair of attitudes within each joint family, considering the average dips.

localizado no Município de São Sebastião e na SP-98, respectivamente.

As tabelas 2 e 3 apresentam os resultados para as rodovias SP-98 e SP-55, respectivamente. O mapa baseado na densidade de lineamentos com resolução espacial de 1000 m mostrou um maior índice de acertos para as ocorrências na classe de suscetibilidade alta, alcançando 93,2% na SP-98

e 60,0% na SP-55. No entanto, a porcentagem de trechos classificados como de risco alto foi elevada, com 82,8% para a SP-98 e 40,1% para a SP-55. Esse resultado requer ponderação, especialmente considerando que aproximadamente 25% do trecho analisado da SP-55 está localizado em uma planície costeira, distante de áreas com maior declividade.

TABELA 1 – Combinações de intersecções para cada direção de segmento de rodovia.

TABLE 1 – Intersection combinations for each direction of the roadway segment.

<i>Direção do movimento da cunha</i>	<i>Combinações de intersecções de famílias para cada direção de movimento da cunha</i>									
<i>Rumo N-S</i>	N-S x NNE-SSW	N-S x NNW-SSE	NNE-SSW x E-W	NE-SW x WNW-ESE	NE-SW x NNW-SSE	E-W x WNW-ESE	E-W x NNW-SSE	-	-	-
<i>Rumo NNE-SSW</i>	N-S x NE-SW	N-S x ENE-WSW	N-S x E-W	NNE-SSW x NE-SW	NE-SW x E-W	NE-SW x NNW-SSE	E-W x NW-SE	E-W x NNW-SSE	WNW-ESE x NW-SE	-
<i>Rumo NE-SW</i>	N-S x E-W	N-S x WNW-ESE	NNE-SSW x NE-SW	ENE-WSW x E-W	E-W x NNW-SSE	WNW-ESE x NW-SE	NW-SE x NNW-SSE	-	-	-
<i>Rumo ENE-WSW</i>	N-S x NW-SE	N-S x NNW-SSE	NE-SW x WNW-ESE	NE-SW x NNW-SSE	-	-	-	-	-	-
<i>Rumo E-W</i>	N-S x NNE-SSW	N-S x NNW-SSE	NE-SW x WNW-ESE	NE-SW x NNW-SSE	ENE-WSW x E-W	ENE-WSW x NW-SE	-	-	-	-
<i>Rumo WNW-ESE</i>	N-S x NE-SW	NNE-SSW x NE-SW	NE-SW x NNW-SSE	ENE-WSW x NW-SE	E-W x WNW-ESE	-	-	-	-	-
<i>Rumo NW-SE</i>	N-S x ENE-WSW	N-S x E-W	N-S x WNW-ESE	NNE-SSW x NE-SW	NNE-SSW x E-W	E-W x WNW-ESE	-	-	-	-
<i>Rumo NNW-SSE</i>	N-S x E-W	N-S x NW-SE	N-S x NNW-SSE	NE-SW x E-W	NE-SW x WNW-ESE	ENE-WSW x E-W	E-W x NW-SE	-	-	-

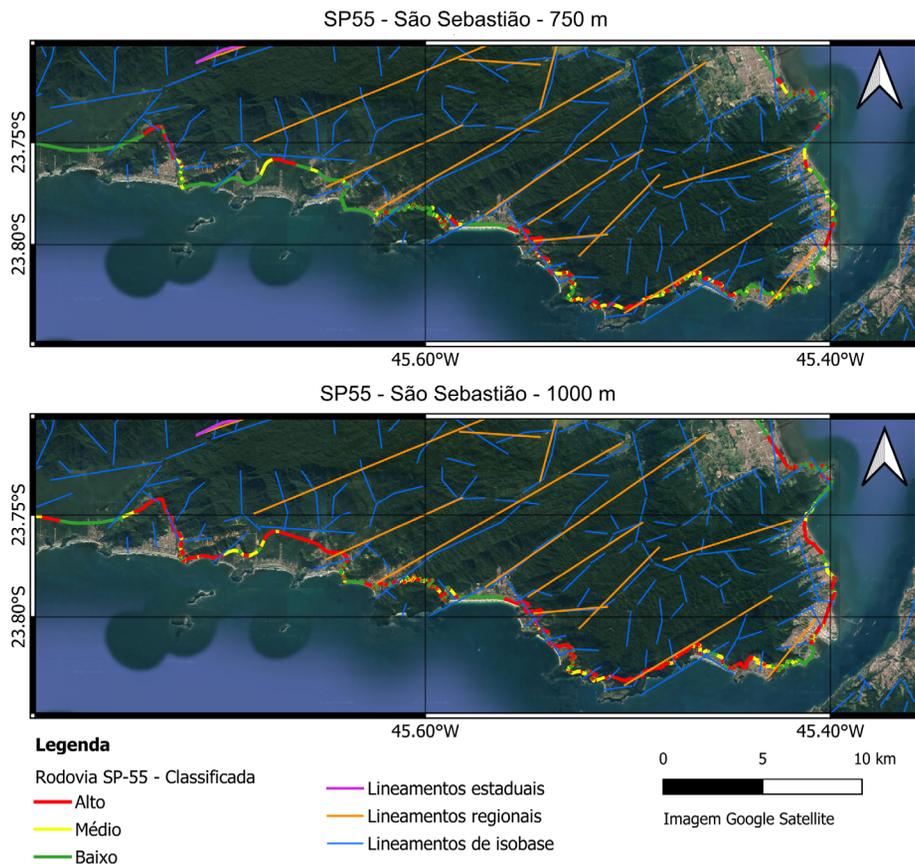


FIGURA 9 – Suscetibilidade a rupturas por fraturas obtidas da densidade de lineamentos na resolução espacial de 750 m e 1000 m na Rodovia SP-55, Município de São Sebastião.

FIGURE 9 – Fracture-induced failure susceptibility based on lineament density models at 750 m and 1000 m spatial resolutions along the SP-55 highway, Municipality of São Sebastião.

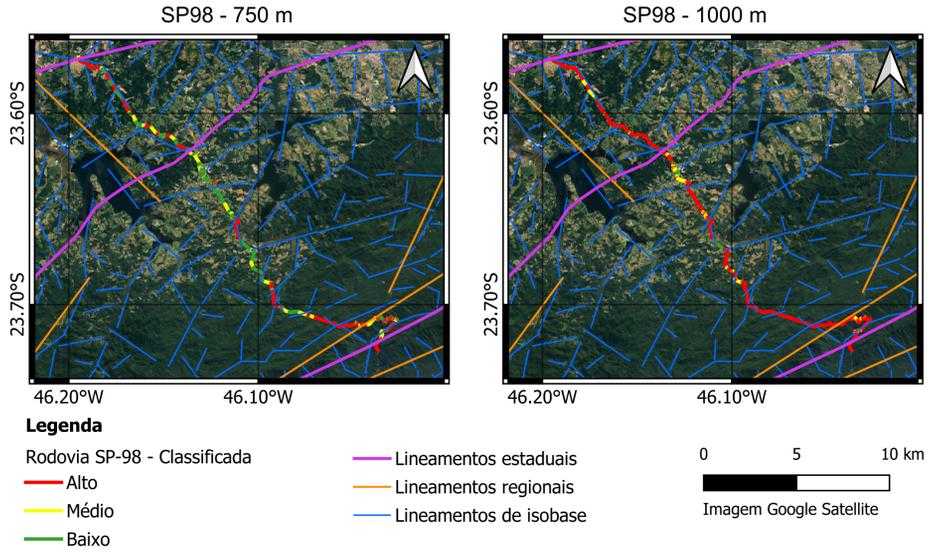


FIGURA 10 – Suscetibilidade a rupturas por fraturas obtidas da densidade de lineamentos na resolução de 750 m e 1000 m na Rodovia SP-98, de Mogi das Cruzes à Bertiooga.

FIGURE 10 – Fracture-induced failure susceptibility based on lineament density models at 750 m and 1000 m spatial resolutions along the SP-98 highway segment between Mogi das Cruzes and Bertiooga.

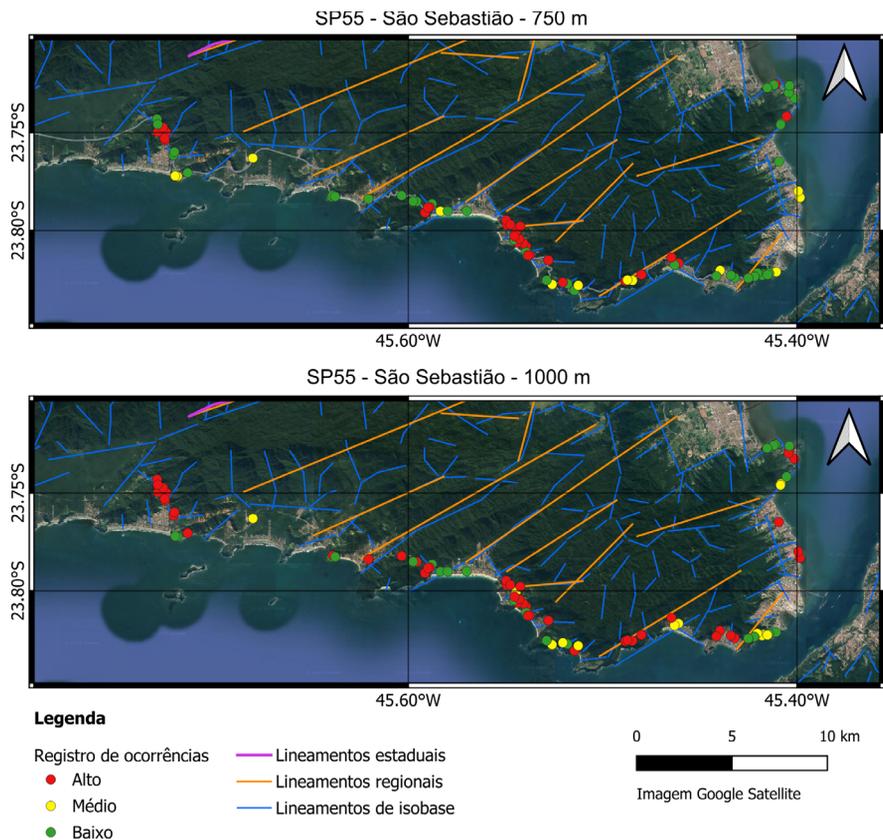


FIGURA 11 – Classificação das ocorrências de deslizamentos a partir da suscetibilidade à rupturas por fraturas obtidas na resolução espacial de 750 m na Rodovia SP-55, no Município de São Sebastião.

FIGURE 11 – Landslide occurrence classification based on susceptibility to fracture-related slope failures, derived from the 750 m spatial resolution model along the SP-55 highway, São Sebastião municipality.

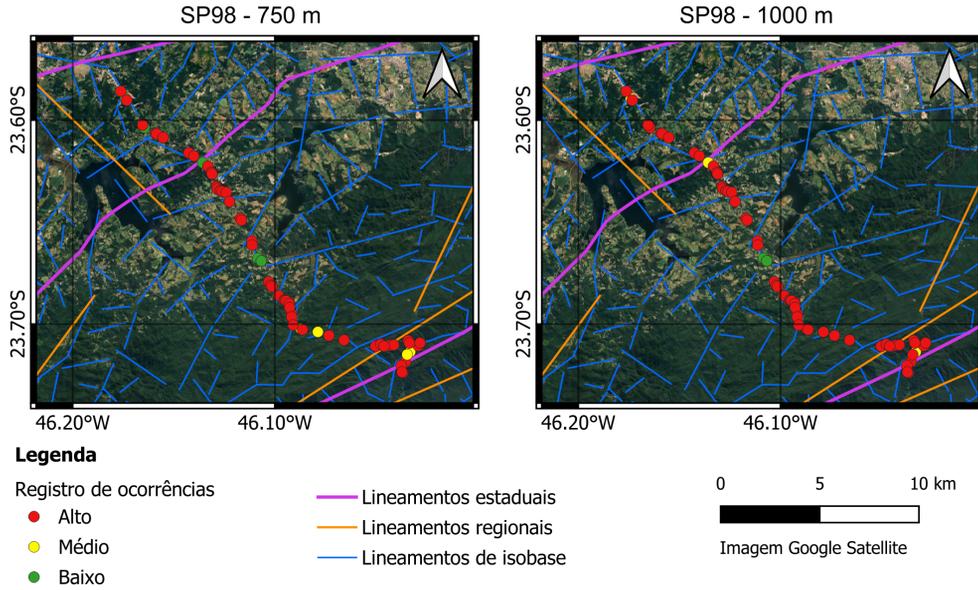


FIGURA 12 – Classificação das ocorrências de deslizamentos a partir da suscetibilidade a rupturas por fraturas obtidas na resolução espacial de 750 m e 1000 m na Rodovia SP-98, entre Mogi das Cruzes e Bertiooga.

FIGURE 12 – Landslide occurrence classification based on susceptibility to fracture-related failures at 750 m and 1000 m spatial resolutions along the SP-98 highway segment between Mogi das Cruzes and Bertiooga.

TABELA 2 – Classificação das ocorrências de deslizamentos a partir da suscetibilidade a rupturas por fraturas obtidas na resolução espacial de 750 m e 1000 m na Rodovia SP-98.

TABLE 2 – Landslide occurrence classification based on fracture-related failure susceptibility mapped at 750 m and 1000 m spatial resolutions along the SP-98 highway.

Resolução espacial 750 m		Relação acerto/comprimento			
Classe de suscetibilidade combinada	Registros		Segmento de rodovia		
	n°	%	km	%	
Alto	88	85,4%	25,2	42,3%	
Médio	8	7,8%	12,3	20,7%	
Baixo	7	7,8%	22,0	37,0%	
Total Geral	103	-	59,5	-	

Resolução espacial 1000 m		Relação acerto/comprimento			
Classe de suscetibilidade combinada	Registros		Segmento de rodovia		
	n°	%	km	%	
Alto	96	93,2%	49,3	82,8%	
Médio	4	3,9%	7,3	12,3%	
Baixo	3	2,9%	2,9	4,8%	
Total Geral	103	-	59,5	-	

TABELA 3 – Correlação de pontos de escorregamento com as classes dos segmentos das rodovias e a avaliação de acerto na SP-55.

TABLE 3 – Correlation between landslide occurrences and road segment classifications, and performance evaluation on highway SP-55.

Resolução espacial 750 m		Relação acerto/comprimento			
Classe de suscetibilidade combinada	Registros		Segmento de rodovia		
	n°	%	km	%	
Alto	55	34,4%	36,3	20,7%	
Medio	76	47,5%	19,8	11,3%	
Baixo	29	18,1%	119,5	68,0%	
Total Geral	160	-	175,6	-	

Resolução espacial 1000 m		Relação acerto/comprimento			
Classe de suscetibilidade combinada	Registros		Segmento de rodovia		
	n°	%	km	%	
Alto	96	60,0%	70,4	40,1%	
Médio	46	28,8%	19,4	11,0%	
Baixo	18	11,3%	85,8	48,9%	
Total Geral	160	-	175,6	-	

Para a resolução espacial de 1000 m, embora os índices de acerto para a classe alta sejam significativos, eles não permitem uma compartimentação adequada do terreno, uma vez que a classe alta ocupa uma grande extensão da rodovia, dificultando a priorização de áreas críticas. A análise conduzida com uma resolução espacial de 750 m mostrou índices de acerto para a classe alta, com 85,4% (SP-98) e 34,4% (SP-55). Entretanto, ao considerar as classes alta e média juntas, os acertos aumentaram substancialmente: na SP-98, 92,2% do trecho apresentou acertos, com 42,3% da rodovia classificada como de risco alto, enquanto na SP-55 o índice de acerto foi de 81,9%, com apenas 20,7% da rodovia classificada como de risco alto.

Há que se considerar que a metodologia empregada considerou que houvesse cortes em ambos os lados da rodovia, o que não reflete a realidade. Esse tratamento levou à avaliação generalizada de trechos, incluindo áreas em que não há cortes significativos, como trechos de serra na SP-98 e de beira de encosta na SP-55. Essa abordagem amplia o número de segmentos classificados como de risco alto, o que pode superestimar a suscetibilidade em trechos que não apresentam condições estruturais relevantes para rupturas. O método também foi considerado para rupturas em taludes de corte com alto ângulo; a partir do uso de insumos de melhor qualidade (melhor escala de topografia convencional, métodos LiDAR - *Light Detection and Ranging*, ou interferometria de radar), podem ser estabelecidos segmentos com cortes de mergulho médio, que não atendam os critérios 2 das tipologias de ruptura (Quadro 1), que pode diminuir o número de discontinuidades e intersecções que efetivamente podem causar rupturas.

É importante destacar que o índice de acerto de ocorrência em classe alta não deve ser analisado isoladamente. Caso toda a rodovia fosse classificada em risco alto, o índice de acerto seria de 100%, uma vez que quaisquer registros de ocorrência resultariam em classe alta. No entanto, essa abordagem seria ineficaz, pois não permitiria priorizar áreas específicas para monitoramento ou intervenções. Assim, o objetivo da metodologia é alcançar o melhor equilíbrio possível entre um alto índice de acerto e a menor extensão de área classificada em risco alto. Esse critério aumenta a eficiência da utilização dessa classificação, permitindo identificar áreas prioritárias para ações de monitoramento ou mitigação.

6 CONCLUSÕES

Neste artigo procurou-se avaliar a suscetibilidade de rupturas de taludes causada por discontinuidades do maciço rochoso ao longo das rodovias SP-98 e SP-55, bem como explorar a aplicação da análise combinada de lineamentos morfoestruturais com dados da análise estrutural rúptil. Os resultados alcançados podem ser considerados satisfatórios, considerando que a proposta metodológica visa a classificação de maciços rochosos, ou de compartimentos de solos de alteração que frequentemente guardam discontinuidades preexistentes das rochas originais. Dessa maneira, é essencial observar outros processos de escorregamento para incorporá-los em avaliações futuras. Exemplos incluem escorregamentos em solos não estruturados, como os solos colúviais, e mecanismos de escorregamento do tipo circular. Também é relevante destacar que este estudo não considerou foliações e falhas originalmente reversas com médio e baixo ângulo de mergulho, fatores que podem influenciar significativamente a estabilidade dos maciços em determinadas condições.

Os mapas de suscetibilidade a rupturas elaborados com base na densidade de lineamentos morfoestruturais apresentaram índices de acerto elevados quando comparados aos dados prévios de rupturas cadastradas em eventos pretéritos. O melhor resultado foi obtido da análise conduzida com resolução espacial de 750 m, se considerados as classes alta e média em conjunto, com acertos de 82,9% e 92,2% nos trechos avaliados das rodovias SP-98 e SP-55, respectivamente. Os trechos classificados como de risco alto correspondem a 42,3% para alto para a Rodovia SP-98 e 20,7% para a SP-55.

Os trechos de rodovia foram avaliados de maneira contínua. Para aplicações futuras, recomenda-se a adoção de parâmetros adicionais que filtrem apenas os trechos em corte, como a declividade e a amplitude do terreno. Esses filtros ajudariam a restringir a análise a segmentos onde a avaliação de ruptura é mais relevante, eliminando áreas planas ou sem cortes de maiores dimensões. A adoção de mapeamentos geotécnicos, que permitam descartar depósitos gravitacionais pretéritos e encostas sob processo de rastejo, também deve melhorar a eficiência da metodologia.

Por fim, deve ser destacado que as classes direcionais utilizadas são uma aproximação das atitudes das discontinuidades. A partir do detalhamento das discontinuidades com observações de campo e melhor correlação de tectônica rúptil com os

lineamentos morfoestruturais a acurácia pode ser melhorada.

Os procedimentos propostos podem auxiliar na compreensão de processos relevantes na análise da suscetibilidade a escorregamentos, uma vez que a presença de descontinuidades preexistentes vem sendo pouco considerada na maior parte dos trabalhos desta natureza. A metodologia permite que nas análises de suscetibilidade sejam empregadas novas geotecnologias, tais como aprendizagem de máquina e inteligência artificial, bem como a aplicação de insumos de melhor qualidade para a avaliação da geometria dos taludes, como as nuvens de pontos obtidas por LiDAR (*Light Detection and Ranging*) aerotransportado, interferometria de radar, ou em determinadas condições de cobertura vegetal a aplicação de aerofotogrametria a partir de Aeronave Remotamente Pilotada (ARP).

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a equipe do Instituto de Pesquisas Ambientais do Estado de São Paulo e da Regea Geologia, Engenharia e Estudos Ambientais pelos dados de ocorrência de movimentos de massa nos trechos da rodovia, obtidos no âmbito do desenvolvimento do projeto “Elaboração de Planos de Contingência frente a riscos de eventos geodinâmicos em trechos rodoviários selecionados das UBAs de Caraguatubá, Mogi das Cruzes e São Vicente”. C. R. é bolsista de produtividade em pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, processo 307471/2022-5). Gostaríamos também de expressar nossos agradecimentos ao Editor Associado e aos revisores anônimos pelas contribuições.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F. F. M., & Carneiro, C. D. R. (1998). Origem e Evolução da Serra do Mar. *Revista Brasileira de Geociências*, 28(1), 135–150. <http://bjg.siteoficial.ws/1998/n.2/3.pdf>
- Alves, F. M. (2025). *Distribuição das fraturas em maciços rochosos do Estado de São Paulo e implicações para a geração e distribuição de energia, geologia aplicada e ambiente*. [Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo].
- Bazzan, T., & Reckziegel, E. W. (2024). Análise multicritério com o método Analytic Hierarchy Process (AHP) para o mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos no município de Guaratinguetá/SP. *Observatório de La Economía Latinoamericana*, 22(5), Artigo e4879. <https://doi.org/10.55905/oelv22n5-171>
- Brasil. (2012). *Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; altera as Leis nºs 12.340, de 1º de dezembro de 2010, 10.257, de 10 de julho de 2001, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.239, de 4 de outubro de 1991, e 9.394, de 20 de dezembro de 1996; e dá outras providências*.
- Cardoso, D., Riedel, P. S., Vedovello, R., Brollo, M. J., & Tominaga, L. K. (2009). Compartimentação fisiográfica do município de Peruíbe, litoral de São Paulo uma abordagem metodológica como subsídio a avaliação geotécnica de terrenos. *Pesquisa em Geociências*, 36(3), 251–262. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.17837>
- Cerri, L. E. S., Nogueira, F. R., Carvalho, C. S., Macedo, E. S., & Augusto Filho, O. (2007). Mapeamento de risco em assentamentos precários no município de São Paulo (SP). *Geociências*, 26(2), 143–150.
- Debastiani, A. B., Souza, M., Santos, M. A. B., Silva, R. D., Schwade, G. M., Lelis, L., & Botelo, M. F. (2013). Árvore de decisão aplicada na identificação de áreas de risco de deslizamento: comparação dos métodos J48, Funcional Trees e Random Tree. *Anais do VIII Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas*, Curitiba, Paraná.
- Dias, H. C., Hölbling, D., & Grohmann, C. H. (2021). Landslide Susceptibility Mapping in Brazil: A Review. *Geosciences*, 11(10), 425. <https://doi.org/10.3390/geosciences11100425>
- Dietrich, W. E., & Montgomery, D. R. (1998). *SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential*. NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement).
- Faria, D. G. M., & Augusto Filho, O. (2013). Aplicação do Processo de Análise Hierárquica

- (AHP) no Mapeamento de Perigo de Escorregamentos em Áreas Urbanas. *Revista do Instituto Geológico*, 34(1), 23–44. <https://doi.org/10.5935/0100-929X.20130002>
- Fernandez, G. N., Alves, F. M., & Pissato, E. (2015). Análise de estabilidade de talude em maciço rochoso por análise cinemática de descontinuidades. *Anais do 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental*, Bento Gonçalves, 1, 339-348.
- Fernandez, G. N., Simões, P. M., Alves, F. M., Patuci, T. R. C.; Ferreira, C. J. & Kertzman, F. F. (2022). Definição de coeficientes de precipitação crítica (CPC) para emissão de alertas de escorregamento nas rodovias SP-055 e SP-098, litoral norte paulista. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 12(2), 21–32. <https://doi.org/10.29327/241867.12.2-3>
- Ferreira, C., & Rossini-Penteado, D. (2011). Mapeamento de risco a escorregamento e inundação por meio da abordagem quantitativa da paisagem em escala regional. *Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental*.
- Golts, S., & Rosenthal, E. (1993). A morphotectonic map of the northern Arava in Israel, derived from isobase lines. *Geomorphology*, 7(4), 305–315. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(93\)90060-F](https://doi.org/10.1016/0169-555X(93)90060-F)
- Grohmann, C. H., Riccomini, C., & Chamani, M. A. C. (2011). Regional scale analysis of landform configuration with base-level (isobase) maps. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1493–1504. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1493-2011>
- Hartwig, M. E. (2006). *Tectônica rúptil mesozoica-cenozoica na região da Serra dos Órgãos, RJ* [Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo]. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP. <https://doi.org/10.11606/D.44.2006.tde-15032007-085200>
- Hartwig, M. E., & Pinheiro, V. S. (2022). Estudo sobre a ruptura ocorrida no talude em rocha do km 13,3 da ES-177 (Serra da Aliança, ES). *Anais do 17º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental*, Belo Horizonte, MG. https://schenautomacao.com.br/cbge2022/envio/files/trabalho1_71.pdf
- Hasui, Y., Salamuni, E., & Morales, N. (Eds.) (2020). *Geologia Estrutural Aplicada* (2ª ed.). ABGE.
- Hoek, E., & Bray, J. D. (Eds.) (1981). *Rock Slope Engineering* (3rd ed.). CRC Press.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas. (2014). *Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25.000*. (Nota técnica explicativa, Publicação IPT No. 3016). Instituto de Pesquisas Tecnológicas.
- Instituto Geológico. (2017). *Cadastro Georreferenciado de Eventos Geodinâmicos: 50 Municípios da Região Metropolitana de São Paulo, Baixada Santista e Litoral Norte*. (Relatório Técnico, Projeto Transporte Sustentável de São Paulo, P127723). Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo.
- Instituto Geológico. (2020). *Avaliação e Mapeamento de Risco (Escala Regional e Local) de parte da RMSP - Região Metropolitana de São Paulo (Trechos Norte/Oeste/Sudoeste/Sudeste) e do Litoral Norte*. (Relatórios técnicos e shapefiles). Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo.
- Martini, L. C. P., Uberti, A. A. A., Scheibe, L. F., Comin, J. J., & Oliveira, M. A. T. (2006). Avaliação da suscetibilidade a processos erosivos e movimentos de massa: decisão multicritério suportada em sistemas de informações geográficas. *Geologia USP - Série Científica*, 6(1), 41–52. <https://doi.org/10.5327/S1519-874X2006000200004>.
- Norrish, N., & Wyllie, D. (1996). Rock slope stability analysis. In A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides: investigation and mitigation, Special Report 247* (pp. 391–425). National Research Council.
- Organização das Nações Unidas. (2021). *Mudança do clima 2021: a base científica: sumário para formuladores de políticas*. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações.
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 180, 60–91. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>

- Riedel, W. (1929). Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen. *Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paleotologie*, 8, 354–368.
- Riffel, E. S., Chimelo Ruiz, L. F., & Guasselli, L. A. (2016). Mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos a partir de mineração de dados e do modelo SHALSTAB. *Revista Brasileira de Cartografia*, 68(9), 1805–1818. <https://doi.org/10.14393/rbcv68n9-44444>.
- Soares, P. C., Soares, A. P., & Fiori, A. P. (2002). Raciocínio probabilístico aplicado à suscetibilidade de escorregamentos: um estudo de caso em Campo Largo, Paraná, Brasil. *Boletim Paranaense de Geociências*, 51, 61–76. <https://doi.org/10.5380/geo.v51i0.4171>
- Tchalenko, J. S., & Ambraseys, N. N. (1970). Structural Analysis of the Dasht-e Bayaz (Iran) Earthquake Fractures. *Geological Society of America Bulletin*, 81(16), 41–60. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1970\)81\[41:SAOTDB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1970)81[41:SAOTDB]2.0.CO;2)
- United Nations Environment Programme. (2021). *Adaptation Gap Report 2020*. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/adaptation-gap-report-2020>
- United Nations International Strategy for Disaster Reduction. (2009). *Terminology on Disaster Risk Reduction*. <https://www.undrr.org/publication/2009-unisdr-terminology-disaster-risk-reduction>
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In R. L. Schuster & R. J. Krizek (Eds.). *Landslides: analysis and control (Special report 176)*. (pp. 11-33). National Research Council.
- Vedovello, R. (2000). *Zoneamento geotécnicos aplicados à gestão ambiental, a partir de Unidades Básicas de Compartimentação – UBC's*. [Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista].
- Vedovello, R., Ferreira, C. J., Salim, A., Matsuzaki, J., Matsuzaki, K., Rossini-Penteado, D., & Ohata, A. (2020). Unidades Básicas de Compartimentação (UBC) do Estado de São Paulo e seu uso para avaliações geoambientais e planejamento territorial. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 10(1), 73–87.
- White, G. F. (1974). Natural hazards research: concepts, methods, and policy implications. In G. F. White (Ed.). *Natural hazards: local, national, global*. (pp. 3-16). Oxford University Press.
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T. & Davis, I. (2004) *At risk: Natural hazards, people's vulnerability and disasters*. Routledge.
- Yin, K. L., & Yan, T. Z. (1988). Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks. *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*, Lausanne, 2: 1269-1272.

Manuscrito submetido em 24 de janeiro de 2025, aceito em 15 de agosto de 2025.

Como citar: Alves, F. M., Riccomini, C., & Lima, K. S. (2025). Suscetibilidade de ruptura de taludes por fraturas: uma abordagem a partir de lineamentos morfoestruturais e da análise estrutural rúptil. *Derbyana*, 46, Artigo e848.

Contribuição dos autores: F.M.A.: Conceitualização, análise de dados, redação, metodologia e revisão. C.R.: Análise de dados, redação, metodologia e revisão. K.S.L.: Análise de dados, metodologia, resultados e mapas.

Conflito de interesses: Os autores declaram que não há conflito de interesses.

