

Investigação geotécnica de taludes rochosos por meio da análise estrutural: estudo de caso da BR-116, Rio Grande do Sul

*Geotechnical investigation of rocky slopes through structural analysis:
Highway 116 case study, Rio Grande do Sul*

Luiz Felipe Nadalin¹ , Alberto Pio Fiori² , Donizeti Antônio Giusti² , Eduardo Salamuni² 

¹Universidade Federal do Paraná - UFPR, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Centro Politécnico, Caixa Postal 19.001, CEP 81531-980, Jardim das Américas, Curitiba, PR, BR (felipe.nadalin@hotmail.com)

²Universidade Federal do Paraná - UFPR, Departamento de Geologia, Curitiba, PR, BR (alberto.fiori@yahoo.com.br; donizeti@ufpr.br; salamuni@ufpr.br)

Recebido em 9 de outubro de 2018; aceito em 6 de novembro de 2020

Resumo

A BR-116, localizada no nordeste do estado do Rio Grande do Sul, atravessa a Escarpa da Serra Geral, composta de derames ácidos e básicos da Formação Serra Geral. Diversos movimentos de massa são observados na rodovia, relacionados com a queda e os deslizamentos de blocos dos taludes rochosos. Como hipótese, pretendeu-se verificar se as famílias de fraturas tectônicas regionais causam os movimentos de massa nos taludes da BR-116. O objetivo desta pesquisa foi aperfeiçoar os métodos de investigação geotécnica, correlacionando a Geologia Estrutural com a estabilidade de taludes rochosos. Entre os métodos utilizados estão o sensoriamento remoto e a análise de lineamentos estruturais, a análise estrutural geométrica e a análise geotécnica dos maciços rochosos (identificação de possíveis planos de ruptura e cálculo de seus fatores de segurança). Os resultados dos lineamentos estruturais regionais indicam o predomínio da direção ENE, seguida pelas direções subordinadas NE e WNW. Em relação às fraturas de alto ângulo analisadas em campo, caracterizou-se um máximo com direção N50-70E, similar ao observado regionalmente. A interpretação do diagrama de movimentos de massa indica que 75% dos movimentos que podem ocorrer na BR-116 seriam causados por deslizamentos em cunha, e o restante são planares, com predomínio de descontinuidades de alto ângulo. A direção máxima dos lineamentos (N70-90E) pode causar movimentos em seis dos sete taludes estudados, e o segundo máximo (N60-80W) condiciona deslizamentos em quatro dos sete pontos. Essa evidência mostra que as estruturas provenientes dos lineamentos regionais são as que mais podem gerar movimentos de massa.

Palavras-chave: Estabilidade de taludes; Fator de segurança; Geologia estrutural; BR-116.

Abstract

The highway BR-116, located northeast of Rio Grande do Sul State, intersects the Escarpa da Serra Geral, composed of acid and basic lava flows of the volcanic Serra Geral Formation. Several mass movements can be observed on the highway, related to the fall and slides of blocks of the rocky slopes. As a hypothesis, it was intended to verify whether families of regional tectonic fractures induce the mass movements on the slope of BR-116. The objective of this research was to improve the methods of geotechnical investigation, correlating the Structural Geology with the stability of rocky slopes. Among the methods used are remote sensing and analysis of structural lineaments, geometric structural analysis, and geotechnical analysis of rock massifs (identification of possible rupture plans and calculation of their Safety Factors). The results of the regional structural lineaments indicate the predominance of the ENE direction, followed by the subordinate NE and WNW directions. Regarding the high angle fractures analyzed in the field, it was characterized the maximum direction N50-70E, similar to the one observed regionally. The interpretation of the mass movement diagram indicates that 75% of the movements that can occur in the BR-116 would be caused by wedge slides, and the rest are planar, with predominance of high-angle discontinuities. The maximum direction of the lineaments (N70-90E) can generate movement in 6 of the 7 slopes studied, and the second maximum (N60-80W) conditions slides in 4 of the 7 points. This evidence shows that the structures coming from regional lineaments are the ones that can generate mass movements the most.

Keywords: Slope stability; Safety factor; Structural geology; BR-116.

INTRODUÇÃO

Os eventos de movimentação de massa são fenômenos geomorfológicos naturais que ocorrem independentemente da presença antrópica. Em função disso, a instalação de uma rodovia requer estudo geológico/geotécnico prévio para determinar se o local escolhido está sujeito a problemas de estabilidade. Atualmente, existem poucos estudos no meio acadêmico a respeito da predição dos eventos de movimento de massa rochosos que, muitas vezes, chegam a ser catastróficos, causando danos ao patrimônio e até perda de vidas.

As estruturas que deformam as unidades sedimentares da Bacia do Paraná e os derrames basálticos sobre elas vêm sendo estudadas desde a década de 1980 por diversos autores (Zalán et al., 1990; Milani, 1997). Recentemente, outros estudos a respeito da tectônica transcorrente Mesozoica-Cenozoica na bacia e em sua borda foram apresentados (Jacques, 2013), inclusive nas rochas alcalinas do Domo de Lajes, no sudeste de Santa Catarina e no nordeste do Rio Grande do Sul (Machado et al., 2012; Nummer et al., 2014; Jacques et al., 2015; Santos, 2017).

O estudo geotécnico relacionado a estruturas tectônicas regionais é aplicado ao desenvolvimento urbano, visto que uma extensa malha rodoviária foi construída sobre essas rochas. Além disso, diversas comunidades habitam regiões serranas, havendo risco de algum desastre ambiental relacionado a eventuais movimentos de massa. Por esse fato, o planejamento de uma rodovia deveria considerar, principalmente, a direção em que ela será construída em relação às descontinuidades mais comuns dos maciços, evitando cortes que podem ser instáveis.

A BR-116 atravessa o trecho da escarpa da Serra Geral (Viero e Silva, 2010) no nordeste do estado do Rio Grande do Sul, iniciando-se a sul de Caxias do Sul e terminando próximo de Novo Hamburgo. Esse local apresenta problemas geotécnicos, em sua maioria relacionados à queda ou ao deslizamento de blocos rochosos, em função de sua antiga construção (década de 1960), possivelmente sem análise prévia, elevando o risco de acidentes próximos aos taludes rochosos.

Pretendeu-se verificar se as famílias de fraturas tectônicas regionais são indutoras dos movimentos de massa nos taludes da BR-116. O estudo se justifica, visto que há probabilidade relativamente elevada de essas estruturas, em meio às feições rúpteis atectônicas internas dos derrames (por exemplo, contato entre derrames, disjunções colunares e tabulares e juntas de alívio), condicionarem os escorregamentos na BR-116. A comprovação dessa hipótese permite que os estudos geotécnicos sejam feitos com mais precisão, focados em áreas críticas nas regiões onde os derrames vulcânicos estão afetados por lineamentos estruturais bastante pervasivos, principalmente nos períodos sazonais de maior pluviosidade.

Além da verificação da hipótese do controle estrutural das áreas de risco, procurou-se contribuir com métodos de investigação geotécnica correlacionados com aspectos inerentes à Geologia Estrutural, envolvendo, quando possível, o estudo das estruturas rúpteis mesozoicas e cenozoicas locais e a estabilidade de taludes rochosos na BR-116.

Localização

A área da pesquisa (Figura 1) está localizada no nordeste do estado do Rio Grande do Sul, nas proximidades de Caxias do Sul, 50 km a norte de Porto Alegre. Está limitada pelas coordenadas geográficas 50°50'0" W e 51°27'0" W, 28°50'0" S e 29°33'0" S, e possui forma retangular alongada na direção norte-sul, com aproximadamente 4.800 km².

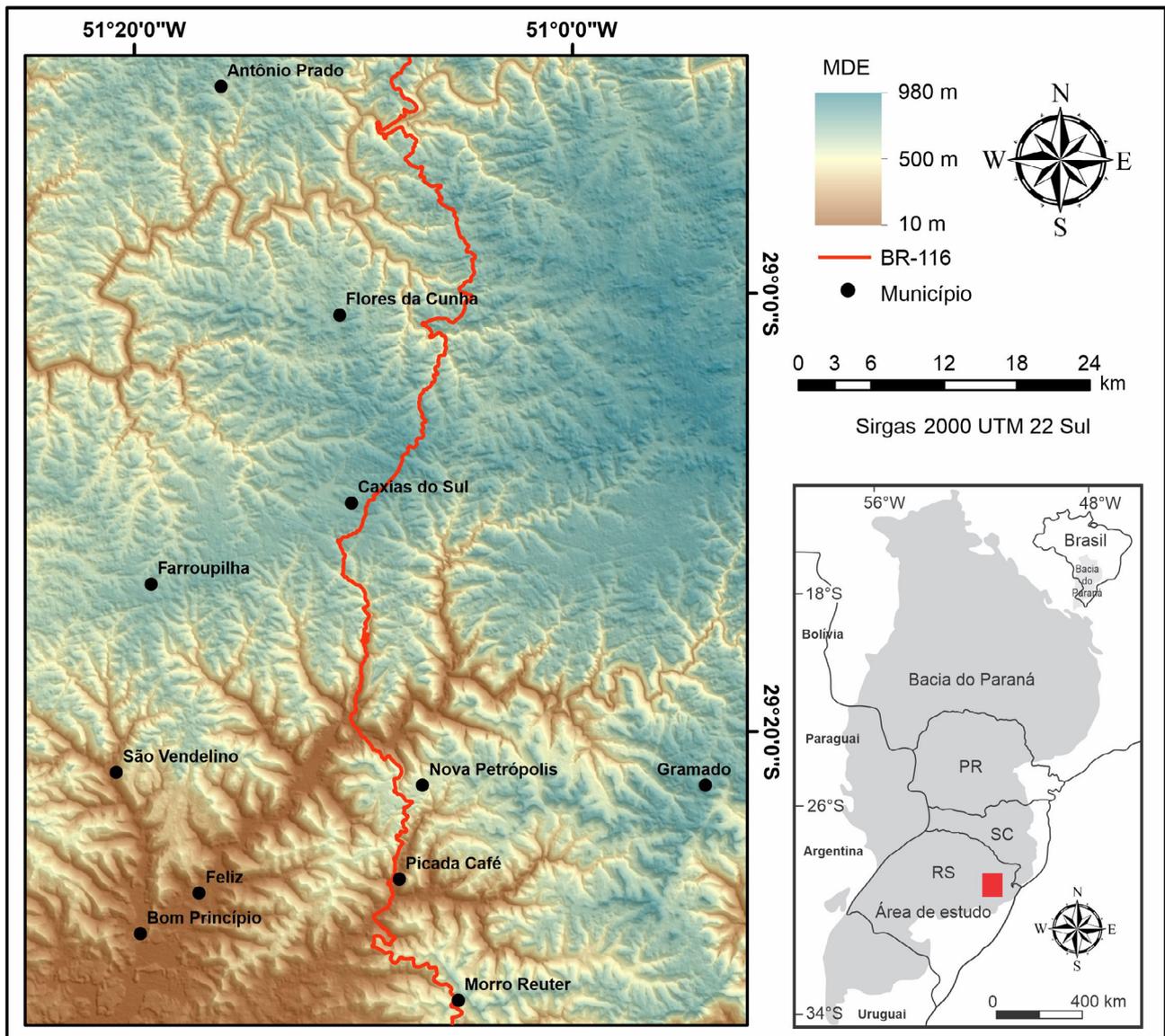
O principal acesso é feito pela BR-116, cortando a área de norte a sul, desde o km 150 ao 260. A escolha da área levou em consideração a boa exposição, por vezes contínua, na forma de taludes que apresentam problemas geotécnicos, concentrados no trecho serrano da Escarpa da Serra Geral (Viero e Silva, 2010).

Arcabouço geológico

A Bacia do Paraná é intracratônica e preenchida por rochas sedimentares e vulcânicas. Possui área de aproximadamente 1.400.000 km², estendendo-se pelo Brasil, pelo Paraguai, pela Argentina e pelo Uruguai com formato alongado NNE-SSW e profundidade máxima de 8.000 m (Zalán et al., 1990).

Originada na forma de golfo aberto, a Bacia do Paraná evoluiu para uma depressão intracontinental durante o Gondwana (Milani e Ramos, 1998). Por causa dos esforços distensivos causados pela abertura do rifte que resulta no Oceano Atlântico, algumas falhas antigas e profundas com direção NE-SW foram reativadas, formando sua estruturação regional (Rostirolla et al., 2000).

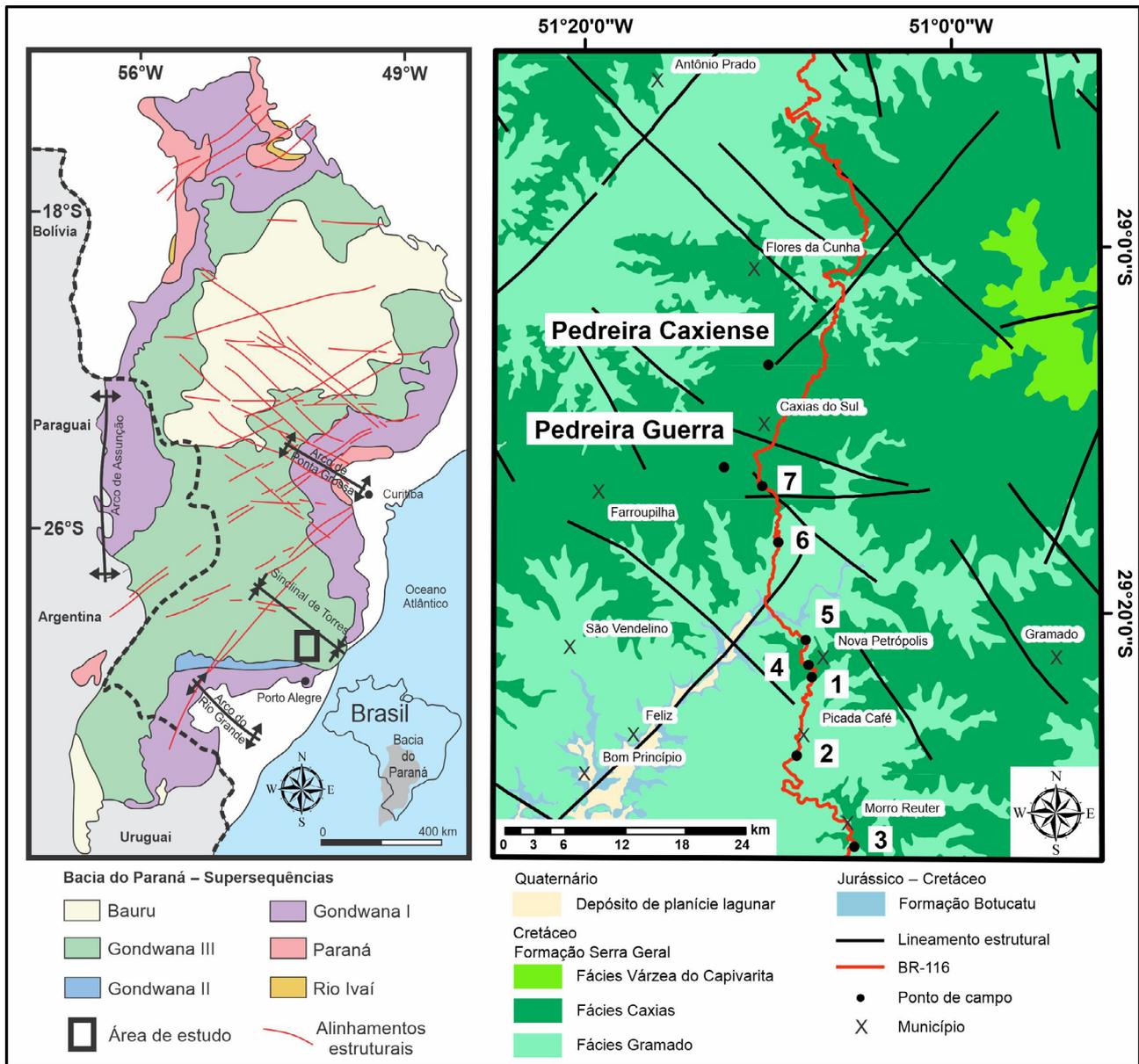
Milani (1997) reconheceu seis supersequências no registro estratigráfico da bacia (Figura 2), com intervalos de dezenas de milhões de anos entre si: rio Ivai (Ordoviciano-Siluriano), composto das formações Alto Garças, Iapó e Vila Maria, do Grupo Rio Ivai (Assine et al., 1994); Paraná (Devoniano), que consiste nas formações Furnas e Ponta Grossa, do Grupo Paraná; Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), formado pelos grupos Itararé, Guatá e Passa Dois; Gondwana II (Meso a Neotriássico), restrito ao Rio Grande do Sul (RS), com a Formação Santa Maria; Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo), apresentando as formações Botucatu e Serra Geral; Bauru (Neocretáceo) com os grupos Bauru e Caiuá (Milani et al., 2007). A Supersequência Gondwana III é caracterizada por rochas do Grupo São Bento (White, 1908), com idade entre o Jurássico e o Cretáceo Inferior, e composta das formações Botucatu e Serra Geral, respectivamente na base e no topo.



A unidade estudada nesta pesquisa é a Formação Serra Geral, produto de um intenso magmatismo fissural associado à ruptura do Continente Gondwana. Com mais de 900.000 km³ de rochas vulcânicas e subvulcânicas, essa formação se estende desde a América do Sul até a África, compondo uma das maiores províncias ígneas (LIP) conhecidas, a Província Magmática Paraná-Etendeka (Turner et al., 1994; Stewart et al., 1996).

Constituídos, em sua maioria, de basaltos toleíticos e andesitos basálticos maciços ou vesiculares, as rochas vulcânicas apresentam textura fanerítica fina a média e

ocorrem por praticamente toda a extensão da Bacia do Paraná. Subordinadamente, afloram derrames ácidos representados por riolitos, riodacitos, dacitos e quartzo latitos. Os basaltos são divididos em dois grupos a partir da razão de seus elementos traço: baixo titânio ($Ti < 2\%$), representados pelo magma tipo Gramado, Ribeira e Esmeralda na porção sul da bacia; e alto titânio ($Ti > 2\%$), representados pelo magma tipo Urubici, Pitanga e Paranapanema na porção norte (Bellieni et al., 1984; Peate et al., 1992; Wildner, 2004). Na área de estudo, ao longo da BR-116 (Figura 2), afloram rochas pertencentes às fácies Gramado, basaltos e



Fonte: Wildner (2006).

Figura 2. Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná (esquerda) – compilado de Milani e Ramos (1998) e Zalán et al. (1987). Mapa geológico da área de estudo (direita). Escala 1:750.000.

diabásios (Peate et al., 1992) e Caxias, dacitos e andesitos (Wildner, 2006).

A idade estimada da Formação Serra Geral é de $134,7 \pm 1$ Ma com duração de magmatismo de cerca 1,2 Ma, segundo Thiede e Vasconcelos (2010).

A Bacia do Paraná possui arcabouço estrutural controlado pela reativação de estruturas presentes no embasamento, composta das rochas da plataforma Sul-Americana, deformadas nos eventos do ciclo Brasileiro (Almeida e Hasui, 1984). Segundo Zalán et al. (1990), o embasamento que

aflores nas margens da bacia é limitado na margem leste/sudeste pelo Cinturão Dom Feliciano e pela Faixa Ribeira, de direção NE; a norte/nordeste pela Faixa Uruaçu e pelos maciços Guaxupé e Goiás; e na margem W pela Faixa Paraguai-Araguaia.

Os derrames da Formação Serra Geral estão associados ao processo diastrófico da reativação Wealdeniana (Almeida, 1967) a partir do Jurássico, que reativou falhas antigas do embasamento (Zalán et al., 1990). O resultado foi o surgimento de blocos de falha, o soerguimento de arcos, o

abatimento de bacias costeiras, a subsidência da Bacia do Paraná e a abertura do Oceano Atlântico Sul.

Soares et al. (2007) compararam os lineamentos estruturais traçados por diversos autores (Ferreira, 1982; Soares et al., 1982; Zalán et al., 1990; Freitas, 2005), identificados por métodos distintos (geofísica aérea, imagens de radar, Landsat e *Shuttle Radar Topographic Mission* — SRTM), concluindo que as direções NW-SE ($N45 \pm 15W$) e NE-SW ($N45 \pm 15E$) possuem índices maiores de concordância do que as direções NNE-SSW, NNW-SSE, N-S e E-W.

Em relação aos lineamentos na borda leste da Bacia do Paraná, estado de Santa Catarina, Jacques et al. (2010) definem as direções N-S e NNE-SSW para o embasamento, NW-SE e N-S para a Sequência Gondwânica, e NE-SW para a Formação Serra Geral. Nummer et al. (2014), a nordeste do RS, caracterizaram a direção predominante WNW-ESE e as direções secundárias NE-SW e NNE-SSW, identificando um padrão de falha transcorrente dextral (NE-SW) e sinistral (NW-SE).

A evolução tectônica da Formação Serra Geral teve início ainda no Cretáceo Inferior, caracterizado como distensivo (σ_3 NE-SW), causando ativações de falhas normais e em tesoura NW-SE com componente dextral (Strugale et al., 2007). Esse foi o evento responsável pela intrusão de diques de diabásio e pelo soerguimento do Arco de Ponta Grossa, cujas idades estão estimadas entre $131,9 \pm 0,4$ e $129,9 \pm 0,1$ Ma (Ernesto et al., 1999). Do Cretáceo Superior ao início do Paleogeno, caracteriza-se um regime tensional (σ_1 variando entre NE-SW e ESSE-WNW), responsável por reativar estruturas presentes nos diques e nas bandas de deformação dos arenitos (Strugale et al., 2007).

Segundo Roldan (2007), essa direção de paleotensão, em regime compressivo (σ_1 NE-SW), foi responsável por ativações de falhas NNE dextrais e E-W sinistrais, possibilitando a colocação das rochas alcalinas, no Cretáceo Superior. Scheibe et al. (1985) definiram a idade desse evento ao datarem as intrusões ígneas, obtendo idades entre 78 e 63 Ma (K/Ar) no domo de Lages, Santa Catarina. Essas rochas estão situadas entre o Arco de Ponta Grossa e o Sinclinal de Torres.

Chavez-Kus e Salamuni (2008), ao estudar a Bacia de Curitiba, definiram uma direção de tensão compressiva (σ_1 N-S), gerando falhas dextrais NNW-SSE e sinistrais NNE-SSW interpretadas como de idade Plio-Pleistocênica. Riccomini (1995), ao estudar o *Rift Continental* do Sudeste Brasileiro (RCSB), determina um evento distensivo com σ_3 E-W, responsável pela formação de *grabens* N-S, no Holoceno. Por último, e ainda atuante, ocorre a compressão com σ_1 E-W, semelhante ao observado por Assumpção (1998) e Assumpção et al. (2016), ao analisar os campos de tensão dos movimentos sísmológicos na placa Sul-Americana. Esse tensor foi registrado também nas proximidades da área de estudo, nos trabalhos de Nummer et al. (2014), a nordeste do RS, e por Santos (2017), a sul de SC.

MÉTODOS

Sensoriamento remoto aplicado à Geologia Estrutural

As imagens utilizadas provêm do Modelo Digital de Elevação (MDE) SRTM, com resolução espacial de 30 m (NASA, 2020). O relevo foi sombreado aplicando-se um ângulo de incidência de iluminação nos azimutes 45 e 315° , realçando as estruturas NW e NE, respectivamente. Aliado a essas imagens, foi utilizado o satélite Landsat-8 OLI (resolução 15 m), composto de oito bandas com comprimentos de ondas distintos, produzido pela *United States Geological Survey* (USGS, 2020). A imagem desse satélite passou por composição das bandas 4-3-2 (Red, Green, Blue — RGB), realizada no *software Envi 4.5*, apresentando-se em luz natural.

Os produtos do MDE e *Landsat* foram tratados e combinados no *software* de geoprocessamento *ArcMap 10.3*, e os lineamentos tectônicos foram traçados nas escalas 1:750.000 (regional) e 1:250.000 (local). Seguiu-se a definição de lineamentos estruturais de O'Leary et al. (1976): feições lineares de uma superfície mapeável, simples ou composta, de forma retilínea ou ligeiramente curva, que refletem estruturas de subsuperfície. A metodologia empregada foi proposta por Liu (1984), identificando falhas e zonas de fraturas de alto ângulo, e separando-as em famílias de acordo com suas direções.

Para calcular o comprimento acumulado dos lineamentos estruturais e seus azimutes foi utilizada a ferramenta *AzimuthFinder* do *ArcMap*, desenvolvida por Queiroz et al. (2014). A confecção dos diagramas de roseta foi feita no *software Openstereo*, cujos resultados foram agrupados em classes com intervalos de 10° , facilitando a interpretação estatística das estruturas regionais.

Análise estrutural geométrica

Em etapa de campo, foram coletados dados geométricos (direção e mergulho) das descontinuidades presentes em sete taludes rodoviários na BR-116 e duas pedreiras de brita em Caxias do Sul. As informações obtidas das pedreiras serviram para ampliar os dados estruturais, somando-se àqueles dos taludes da BR-116.

Na coleta sistemática de dados, utilizou-se o método de amostragem por linhas de varredura sugerido por Robertson (1970), registrando-se todas as estruturas sem intervalos (falhas, juntas, disjunções tabulares e de alívio). As descontinuidades foram caracterizadas a partir da sua orientação espacial, espaçamento, persistência, rugosidade e abertura, de acordo com o proposto por Fiori e Carmignani (2009).

Os dados estruturais foram analisados em estereogramas e diagramas de roseta, a partir do *software Geotec Stereo*, e diagramas de densidade de polos, por meio do *software Rocscience Dips*. Os lineamentos estruturais foram

interpretados utilizando-se o modelo de fraturamento rúptil de Riedel (1929) na abordagem de Wilcox et al. (1973).

Análise geotécnica

Na análise geotécnica da estabilidade de taludes rodoviários, foram identificadas e distinguidas as famílias de fraturas de cada afloramento, e agrupadas quando duas ou mais apresentavam direções e mergulhos semelhantes, com suas médias calculadas no *software Geotec Stereo*. As médias de cada família dos taludes foram analisadas no diagrama de interpretação de movimentos de massa (Fiori e Carmignani, 2009), definindo os possíveis tipos de instabilidades, assim como quais estruturas os condicionam. No deslizamento planar, o rumo de mergulho das descontinuidades deve aflorar na vertente, superando seu ângulo de atrito, e sua direção deve ter até 20° de concordância com o talude. Para o deslizamento em cunha, duas superfícies distintas devem intersectar-se na vertente, junto à linha formada por esses dois planos, e seu ângulo de caimento deve ser maior que o ângulo de atrito.

Cada situação de instabilidade observada no diagrama teve seu fator de segurança (FS) calculado, simulando condições secas e saturadas por água (0 – 25 – 50 – 75 – 100%). Os valores médios de ângulo de atrito (ϕ) e coesão do maciço (C_r) utilizados foram baseados em Bieniawski (1974), tendo sido cada talude analisado e classificado de acordo com suas características físicas (Nadalin, 2018).

Entretanto, para calcular o FS, deve-se considerar o valor de coesão das descontinuidades (C) e não de um maciço com um todo. Para a maioria das estruturas, a C foi calculada segundo a expressão de Pariseau (2011), considerando a persistência (P) das descontinuidades (comprimento ao longo do afloramento) e a coesão da rocha intacta (C_r), conforme Equação 1:

$$C = (1 - P)C_r \quad (1)$$

Em que:

C = coesão das descontinuidades;

P = persistência;

C_r = coesão da rocha intacta.

As fraturas abertas (estruturas T do modelo de Riedel, 1929), por sua vez, são paralelas ao σ_1 E-W atual (Assumpção, 1998; Assumpção et al., 2016) e tiveram seu valor de coesão considerado como zero.

Os FS dos deslizamentos planares foram calculados segundo as Equações 2, 3, 4 e 5:

$$FS = \frac{CA + (P \cos \theta - U)tg\phi}{P \sin \theta} \quad (2)$$

$$A = \frac{H}{\sin \theta} \quad (3)$$

$$P = \frac{1}{2} \gamma H^2 (\cot \theta - \cot \phi) \quad (4)$$

$$U = \frac{1}{4} \gamma_a H_w^2 \operatorname{cosec} \theta \quad (5)$$

Em que:

FS = fator de segurança;

C = coesão das descontinuidades;

A = área;

P = peso;

θ = ângulo de inclinação da descontinuidade;

U = força neutra;

ϕ = ângulo de atrito;

H = altura do talude;

γ = peso específico da rocha;

i = inclinação do talude;

γ_a = peso específico da água;

H_w = altura da coluna de água.

Os deslizamentos em cunha, mais complexos, foram calculados no *software Rocscience Swedge*, enquanto a probabilidade de ocorrer movimentos de massa em cada talude foi calculada no *software Rocscience Dips*.

RESULTADOS

Lineamentos fotointerpretados

Os lineamentos, em geral, são retílineos, refletindo estruturas regionais de alto ângulo de mergulho destacadas no relevo, com estruturas máximas bem definidas e secundárias desviando-se ocasionalmente em certas direções. O diagrama de roseta dos lineamentos na escala 1:750.000 (Figura 3A) apresenta um total de 73 lineamentos, entre 9 e 33 km de comprimento, e direção principal N70-80E. Subordinadamente, ocorrem as direções N20-40E e N60-70W, e com menor expressão, estruturas na direção N-S.

Já na escala 1:250.000 (Figura 3B), foram traçados 531 lineamentos com comprimentos entre 4 e 26 km, com direção máxima N70-80E. Algumas diferenças notáveis são constatadas entre os traçados das duas escalas, entre elas, a presença marcante das estruturas E-W, praticamente inexistentes na escala menor. Os lineamentos subordinados são mais evidentes, ocorrendo as direções N70-80W, N50-60W e N30-40E. No entanto, as estruturas N-S são insignificantes. Essa escala permitiu maior precisão no traçado dos lineamentos locais, porém, muitas vezes, eles podem não simbolizar estruturas significativas e profundas do relevo.

Interpretação dos lineamentos estruturais

Os lineamentos traçados na escala de menor detalhe (1:750.000), que representam as feições mais importantes

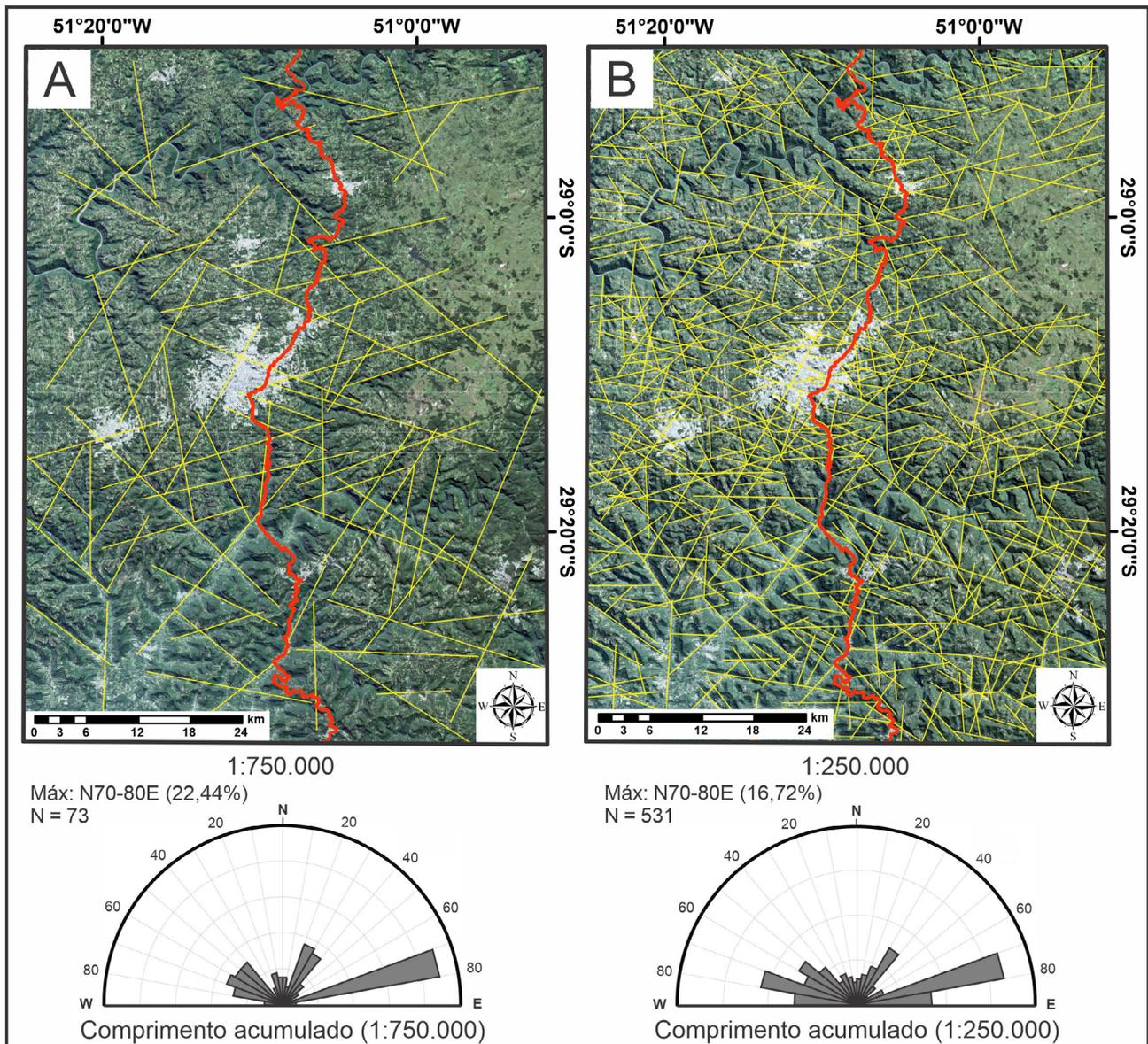


Figura 3. Lineamentos estruturais traçados em imagem *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) e Landsat-8, nas escalas (A) 1:750.000 e (B) 1:250.000, com seus respectivos diagramas estruturais de roseta.

do relevo, foram agrupados e classificados segundo o modelo de fraturamento de Riedel (1929). No geral, os lineamentos nessa proposta enquadram-se aos elementos formados na deformação dútil, em que cada cor representa uma estrutura distinta (Figura 4A).

As direções NW-SE, N-S e NNE-SSW não se encaixaram com precisão nesse modelo, cuja direção de tensão atuante na placa Sul-Americana se posiciona na direção E-W (Assumpção, 1998; Assumpção et al., 2016). Portanto, essas estruturas (feições do embasamento ou falhas antigas

não reativadas no Holoceno) não foram correlacionadas com as restantes.

O estereograma da Figura 4B mostra as falhas que apresentam dados cinemáticos, (vermelha destal e azul sinistral), evidenciadas na pedra Caxiense. Na Figura 4C, correlaciona-se o modelo de Riedel (1929) com as falhas destrais (estruturas Y e R) que se desenvolveram ou foram reativadas durante o evento tectônico atual. A falha sinistral ENE-WSW não foi atribuída à nenhuma estrutura por ser preexistente ao tectonismo recente e não se encaixar no modelo de fraturamento dútil.

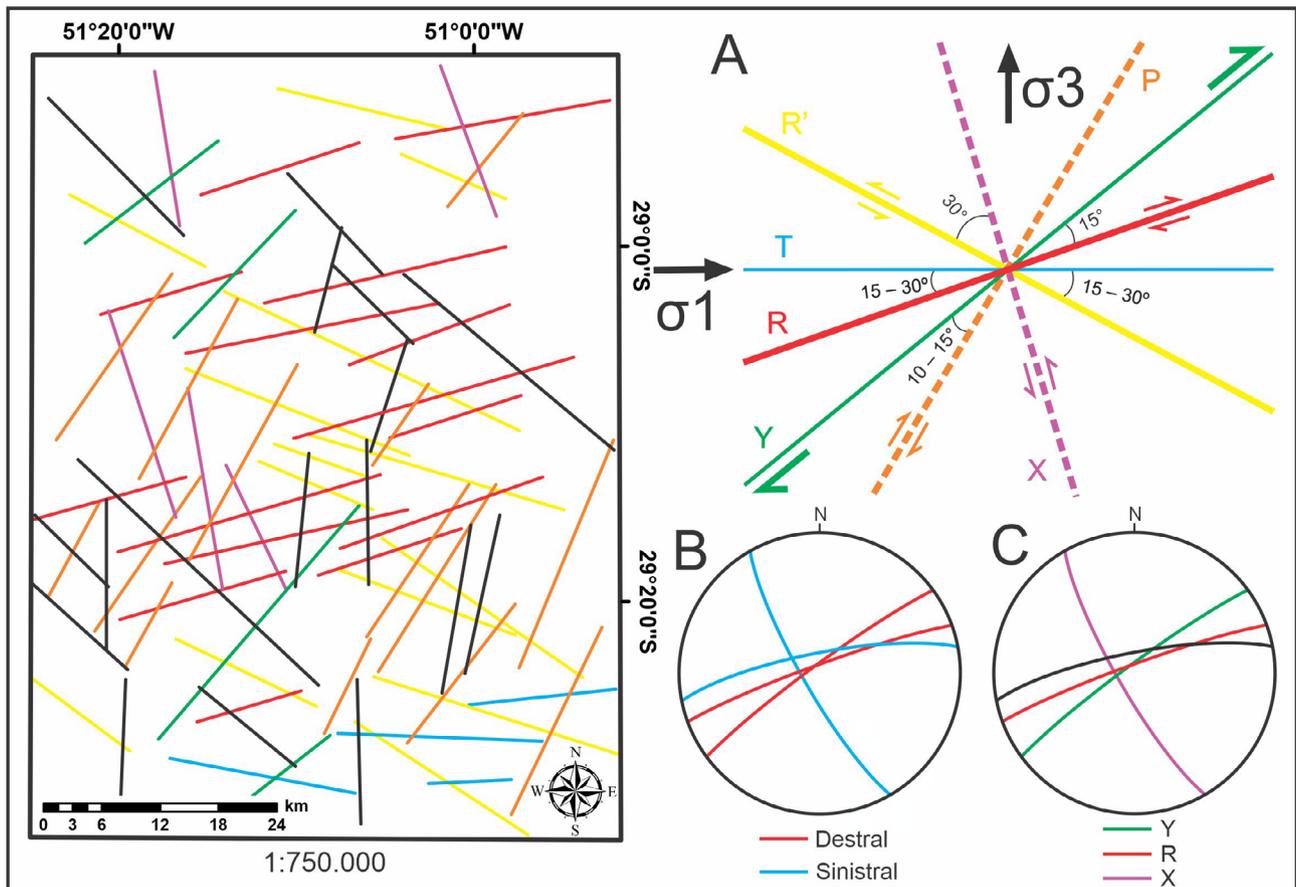


Figura 4. (A) Interpretação dos lineamentos estruturais no modelo de fraturamento de Riedel (1929) com a direção de tensão máxima posicionada na direção E-W; (B) cinemática das falhas medidas na pedra Caxiense; (C) correlação das falhas com as estruturas de Riedel (1929) no modelo tectônico atual.

Análise estrutural geométrica

As estações de campo estudadas (Figura 2) estão localizadas nos taludes da Escarpa da Serra Geral (Viero e Silva, 2010) e em duas pedreiras (Caxiense e Guerra) no município de Caxias do Sul. No total, foram medidas 469 discontinuidades na forma de falhas e juntas tectônicas, além de disjunções tabulares e juntas de alívio, cujas tendências são mostradas em diagramas de rosetas (Figura 5). De maneira geral, os planos de ruptura evidenciados na rodovia encontram-se dispostos em orientações espaciais variadas, desde verticais (predomínio) até horizontais.

O estudo nas pedreiras ampliou o número de dados estruturais e permitiu a obtenção de informações sobre a cinemática das falhas — não observados nos taludes rodoviários —, melhorando a correlação com os lineamentos regionais.

O diagrama de roseta das fraturas (juntas e falhas) levantadas em campo representa apenas as estruturas com médio

a alto ângulo de mergulho (maiores que 60°), desconsiderando-se medidas que não refletem o padrão evidenciado no sensoriamento remoto, como juntas de alívio e disjunções tabulares.

A roseta das medidas tectônicas destaca a direção N60-70E, além de outras direções importantes, tais como N20-30W, E-W e N-S. Ocorrem, ainda, estruturas difusas entre as direções N40-70W.

Os diagramas de roseta para cada afloramento (Figura 6) mostram que em praticamente todos os pontos está bem marcado o máximo de direção NE-SW. Contudo, cada afloramento possui padrão estrutural distinto, influenciado diretamente pela proximidade de grandes lineamentos e por estruturas internas das rochas vulcânicas (disjunções colunares pouco desenvolvidas, por exemplo).

Algumas feições regionais importantes são praticamente inexistentes em alguns pontos, como o caso de estruturas N-S ou NW-SE, o que caracteriza a heterogeneidade estrutural entre os afloramentos.

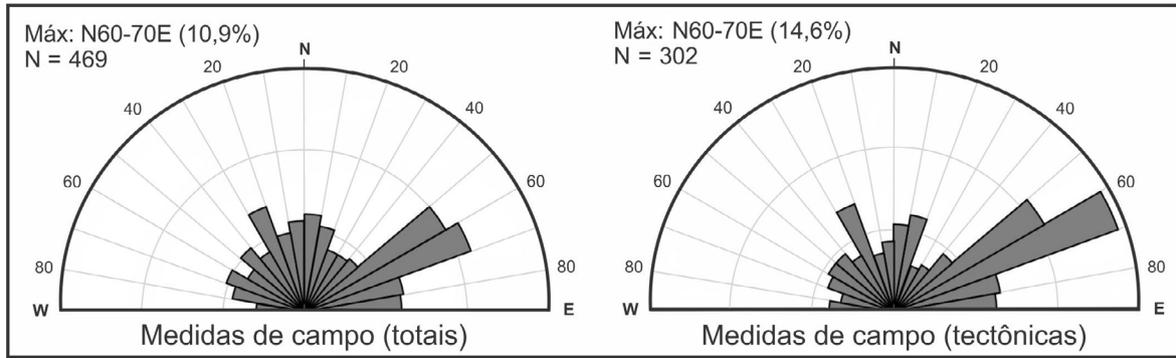


Figura 5. Diagramas de roseta das fraturas observadas em campo (medidas totais e tectônicas).

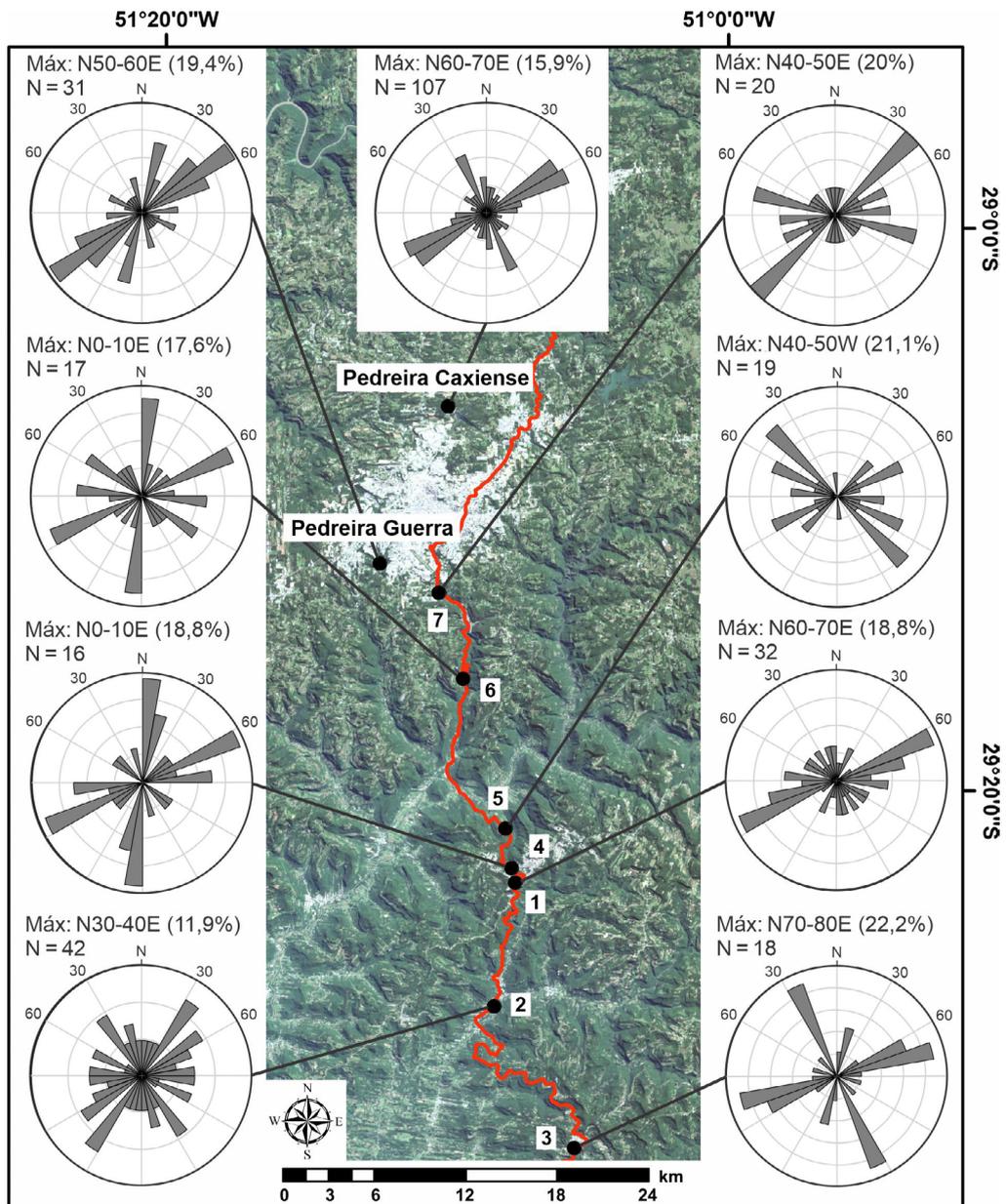


Figura 6. Diagramas de roseta das discontinuidades de alto ângulo dos pontos de campo.

Análise geotécnica

Os diagramas de interpretação de movimentos de massa, ilustrados nas Figuras 7 a 13, indicaram 32 movimentos passíveis de ocorrer nos taludes analisados da BR-116, com média de 4,5 escorregamentos para cada ponto de campo. Desse total, 75% são movimentos que podem ser causados por deslizamento em cunha (indicados por um círculo na intersecção de duas descontinuidades), e os 25% restantes, por deslizamento planar (rumos de máximo mergulho das estruturas). A seguir, encontram-se resumidos cada talude: o ponto 1 apresenta dois deslizamentos planares e quatro em cunha (Figura 7); o ponto 2, um deslizamento planar e três em cunha (Figura 8); o ponto 3, um deslizamento planar e

outro em cunha (Figura 9); o ponto 4 não apresentou instabilidades (Figura 10); o ponto 5 apresenta um deslizamento planar e dois em cunha (Figura 11); o ponto 6, o talude com mais movimentos, possui dois deslizamentos planares e oito em cunha (Figura 12); e o ponto 7, um deslizamento planar e seis em cunha (Figura 13).

Em função da grande quantidade de fraturas com ângulos de mergulho acima de 80°, diversos movimentos interpretados encontram-se muito próximos do limite de inclinação do talude (praticamente verticais).

A Tabela 1 apresenta os parâmetros físicos dos maciços rochosos utilizados para calcular o FS para cada movimento interpretado nos taludes. A coesão das fraturas abertas de direção E-W foram consideradas como zero. Esses parâmetros

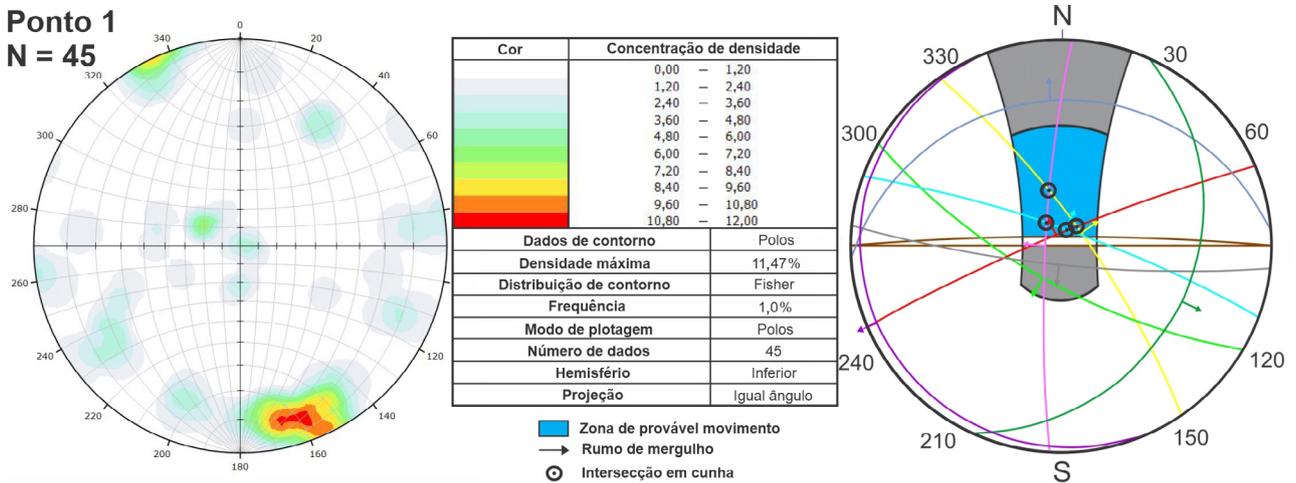


Figura 7. Diagramas estruturais do ponto 1: diagrama de densidade de polos das fraturas (esquerda); diagrama de interpretação de risco de movimento de massa no talude (direita).

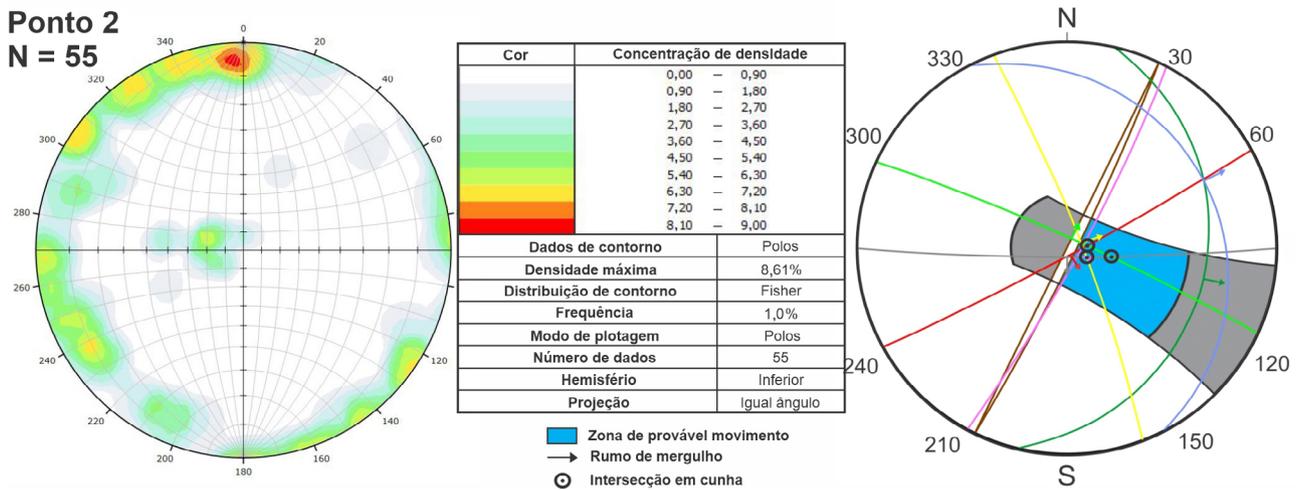


Figura 8. Diagramas estruturais do ponto 2: diagrama de densidade de polos das fraturas (esquerda); diagrama de interpretação de risco de movimento de massa no talude (direita).

Ponto 3
N = 30

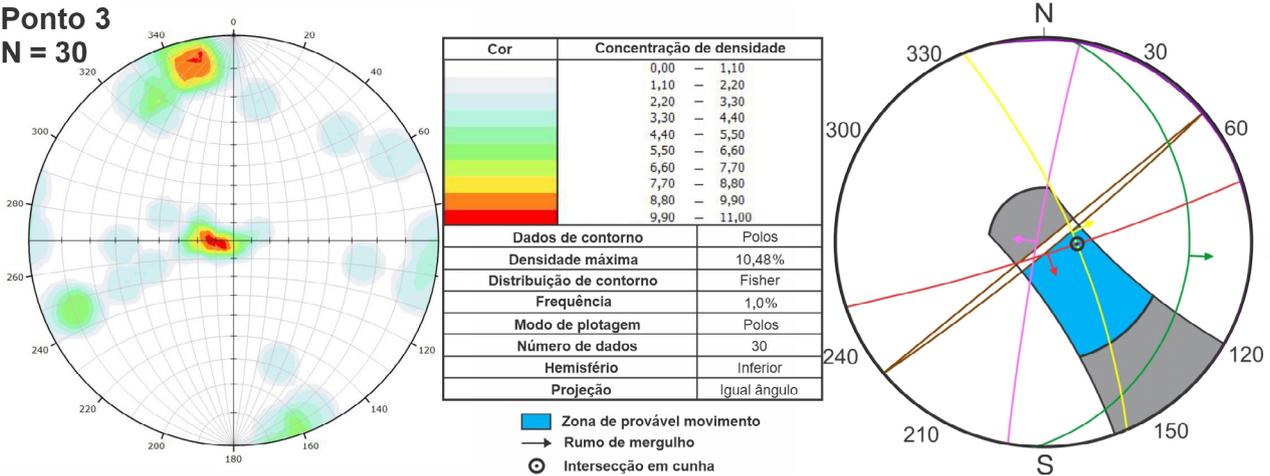


Figura 9. Diagramas estruturais do ponto 3: diagrama de densidade de polos das fraturas (esquerda); diagrama de interpretação de risco de movimento de massa no talude (direita).

Ponto 4
N = 29

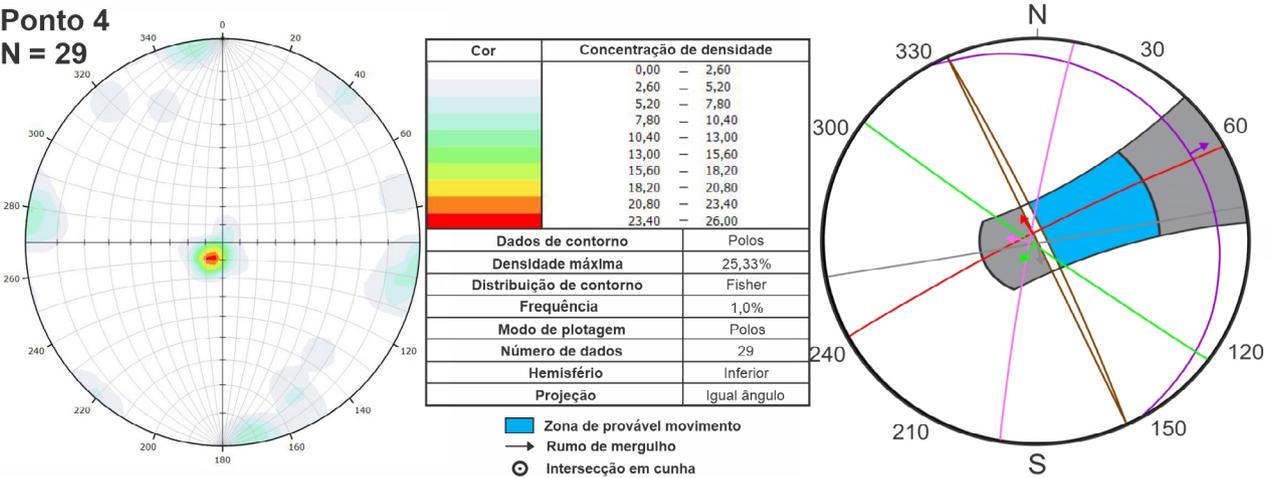


Figura 10. Diagramas estruturais do ponto 4: diagrama de densidade de polos das fraturas (esquerda); diagrama de interpretação de risco de movimento de massa no talude (direita).

Ponto 5
N = 26

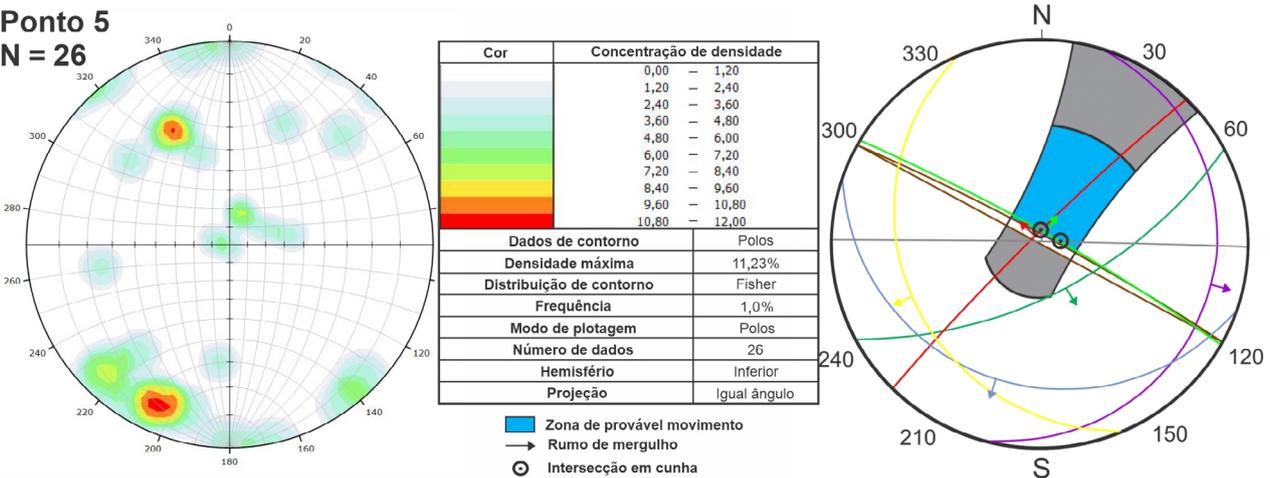


Figura 11. Diagramas estruturais do ponto 5: diagrama de densidade de polos das fraturas (esquerda); diagrama de interpretação de risco de movimento de massa no talude (direita).

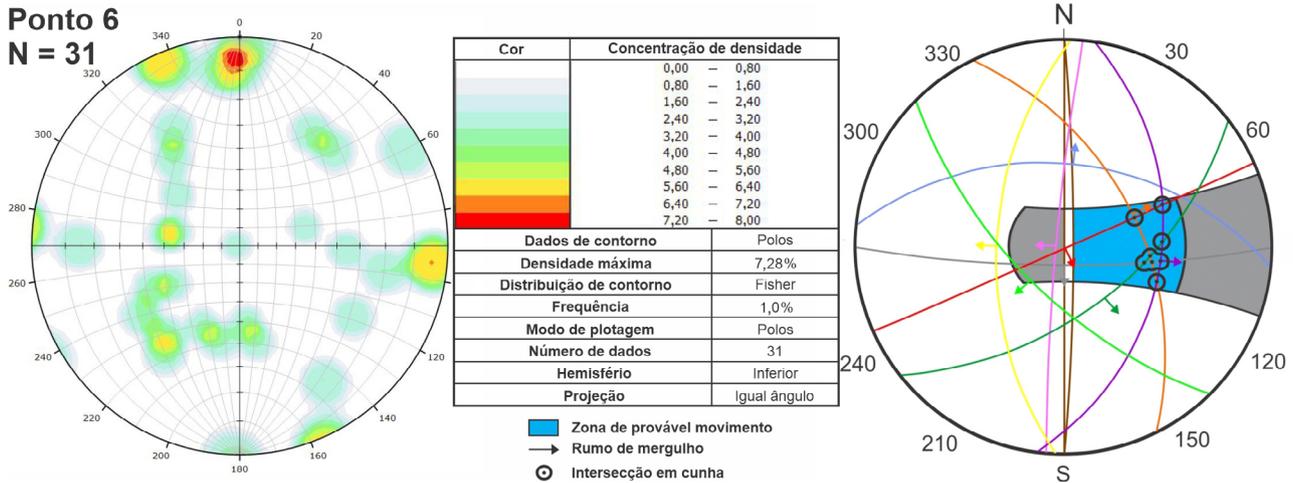


Figura 12. Diagramas estruturais do ponto 6: diagrama de densidade de polos das fraturas (esquerda); diagrama de interpretação de risco de movimento de massa no talude (direita).

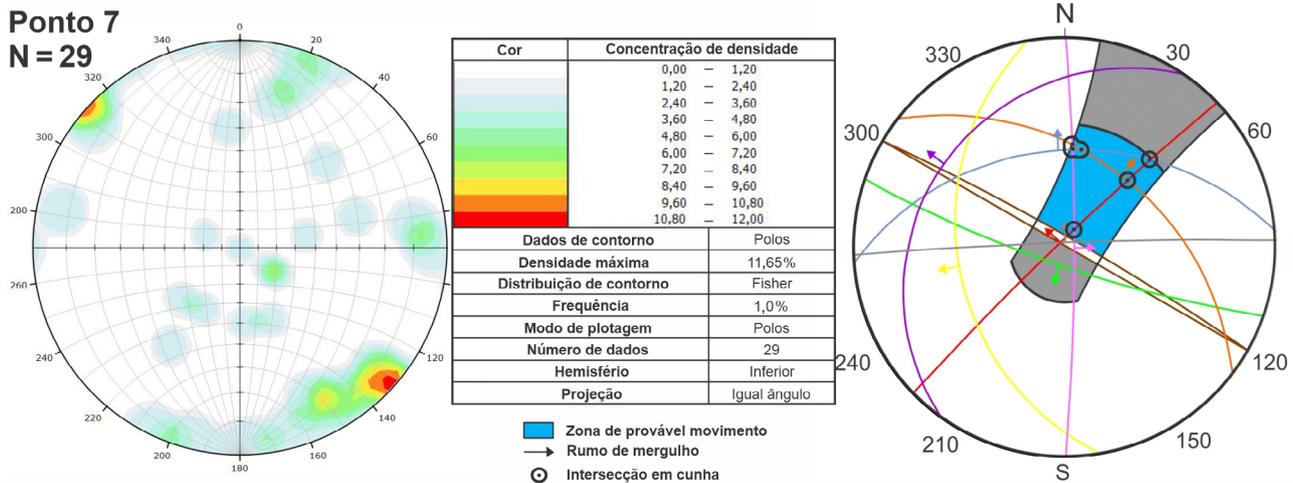


Figura 13. Diagramas estruturais do ponto 7: diagrama de densidade de polos das fraturas (esquerda); diagrama de interpretação de risco de movimento de massa no talude (direita).

Tabela 1. Parâmetros físicos dos maciços rochosos utilizados para calcular o fator de segurança. Para as fraturas abertas de direção E-W, a coesão foi considerada como zero.

	C (Kpa)	ϕ (grau)	H (m)	i (grau)	γ (kN/m ³)	γ_a (kN/m ³)
Ponto 1	12,5	30	6	88	27	10
Ponto 2	12,5	30	6	88	29	10
Ponto 3	12,5	30	10	88	29	10
Ponto 4	6,25	20	6	88	27	10
Ponto 5	17,5	40	10	88	29	10
Ponto 6	12,5	30	15	88	29	10
Ponto 7	17,5	40	6	88	27	10

C: coesão das descontinuidades; ϕ : ângulo de atrito; H: altura do talude; i: inclinação do talude; γ : peso específico da rocha; γ_a : peso específico da água.

também foram utilizados para se calcular a probabilidade de ocorrer movimentos de massa planar e em cunha para cada talude estudado (Tabela 2).

Os resultados do FS dos movimentos de massa interpretados nos diagramas, calculados nas variadas condições de saturação, estão compilados na Tabela 3, junto às famílias de fratura que os condicionam, bem como ilustrados nos gráficos da Figura 14. O FS menor que 1,0 significa que as forças cisalhantes são superiores às resistentes, tornando o talude instável. Para o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT), o valor de FS aceitável nas rodovias deve ser superior a 1,5.

Após o cálculo do FS, evidencia-se que, nas condições secas (0% de saturação), 17 possíveis movimentos estão maiores do que 1,5; nove estão situados entre 1,5 e 1,0; e seis estão abaixo

Tabela 2. Probabilidade em porcentagem de os movimentos planar e cunha ocorrerem nos taludes estudados na BR-116.

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7
Planar (%)	20	10,9	10	6,9	26,9	9,7	10,3
Cunha (%)	40,3	44,18	32,9	14,8	35,7	38,5	21,9

Tabela 3. Resultado dos diagramas de interpretação de movimentos de massa com o fator de segurança seco e saturado em água, para os taludes estudados na BR-116.

Ponto 1	Direção do talude E-W/88N		FS (saturado em água)				
Escorregamento	Cor da família	Atitude média	0%	25%	50%	75%	100%
Planar	Vermelho	337/83	1,85	1,78	1,54	1,16	0,62
Planar	Ciano	20/80	1,23	1,18	1,03	0,79	0,45
Cunha	Rosa	273/80	2,35	2,34	2,28	2,1	1,77
	Amarelo	55/73					
Cunha	Rosa	273/80	1,9	1,88	1,8	0,49	0
	Ciano	20/80					
Cunha	Amarelo	55/73	1,81	1,8	0,66	0,53	0
	Vermelho	337/83					
Cunha	Ciano	20/80	1,17	1,16	1,07	0	0
	Vermelho	337/83					
Ponto 2	Direção do talude N25E/88SE		FS (saturado em água)				
Escorregamento	Cor da família	Atitude média	0%	25%	50%	75%	100%
Planar	Rosa	118/83	1,73	1,66	1,44	1,08	0,58
Cunha	Cinza	180/85	2,37	2,35	2,21	1,84	0
	Verde-claro	25/84					
Cunha	Cinza	180/85	1,48	1,46	1,35	0	0
	Amarelo	69/82					
Cunha	Vermelho	151/86	3,62	3,6	1,31	0	0
	Verde-claro	25/84					
Ponto 3	Direção do talude N50E/88SE		FS (saturado em água)				
Escorregamento	Cor da família	Atitude média	0%	25%	50%	75%	100%
Planar	Vermelho	162/84	1,3	1,21	0,94	0,5	0
Cunha	Vermelho	162/84	1,79	1,78	0,49	0	0
	Amarelo	67/84					
Ponto 4	Direção do talude N25W/88NE		FS (saturado em água)				
Escorregamento	Cor da família	Atitude média	0%	25%	50%	75%	100%
Não apresenta problemas							
Ponto 5	Direção do talude N60W/88NE		FS (saturado em água)				
Escorregamento	Cor da família	Atitude média	0%	25%	50%	75%	100%
Planar	Verde-claro	30/84	1,83	1,7	1,31	0,65	0
	Cinza	1/89					
Cunha	Verde-claro	30/84	2,7	2,66	2,43	0	0
	Vermelho	315/85					
Cunha	Verde-claro	30/84	2,74	2,71	0	0	0

Continua...

Tabela 3. Continuação.

Ponto 6	Direção do talude N-S/88E		FS (saturado em água)				
			0%	25%	50%	75%	100%
Escorregamento	Cor da família	Atitude média					
Planar	Laranja	64/50	0,61	0,59	0,55	0,49	0,4
Planar	Roxo	98/40	0,81	0,79	0,76	0,69	0,6
Cunha	Vermelho	156/89	0,75	0,74	0,72	0,58	0,45
	Laranja	64/50					
Cunha	Vermelho	156/89	1,37	1,36	1,33	1,26	1,11
	Roxo	98/40					
Cunha	Roxo	98/40	1,19	1,18	1,15	1,08	0,92
	Verde-escuro	142/55					
Cunha	Laranja	64/50	0,87	0,86	0,83	0,77	0,63
	Verde-escuro	142/55					
Cunha	Verde-escuro	142/55	1,46	1,45	1,39	1,24	0,95
	Cinza	180/80					
Cunha	Cinza	180/80	1,05	1,04	1,01	0,93	0,77
	Laranja	64/50					
Cunha	Cinza	180/80	0,87	0,86	0,84	0,78	0,65
	Roxo	98/40					
Cunha	Roxo	98/40	0,84	0,83	0,81	0,74	0,62
	Laranja	64/50					
Ponto 7	Direção do talude N60W/88NE		FS (saturado em água)				
			0%	25%	50%	75%	100%
Escorregamento	Cor da família	Atitude média					
Planar	Laranja	38/43	1,35	1,33	1,27	1,17	1,03
Cunha	Rosa	90/85	2,55	2,54	2,49	2,37	2,14
	Laranja	38/43					
Cunha	Laranja	38/43	1,62	1,61	1,57	1,47	1,28
	Azul	356/40					
Cunha	Azul	356/40	1,37	1,36	1,31	1,18	0,69
	Rosa	90/85					
Cunha	Azul	356/40	2,95	2,94	2,88	2,7	2,35
	Vermelho	316/86					
Cunha	Vermelho	316/86	1,57	1,56	1,52	1,43	1,23
	Laranja	38/43					
Cunha	Rosa	90/85	5,49	5,45	5,19	0	0
	Vermelho	316/86					

FS: fator de segurança.

de 1,0. É importante ressaltar que todos os movimentos com FS menores que 1,0 pertencem ao talude 6, maciço que apresenta situação mais crítica de todos os estudados nesta pesquisa.

O FS em todos os movimentos que podem ocorrer (cunha e planar) variam pouco em situações de saturação baixa, começando a apresentar quedas significativas a partir de 50%. Esse fato é observado, por exemplo, no FS dos escorregamentos condicionados por estruturas de alto ângulo (maiores que 80°), que, muitas vezes, chegam ao valor zero.

Nesse caso, as rochas tendem a flutuar entre as descontinuidades, quando há aumento da força neutra exercida pela água no talude, tornando-as sazonalmente instáveis.

Observa-se que o FS dos movimentos com fraturas de ângulos abaixo de 60° não apresenta quedas bruscas quando a saturação está elevada (exceto em um movimento) e não se torna nulo. Nota-se, na maioria dos taludes, que os valores de FS em cunha nas condições secas são relativamente maiores do que os planares.

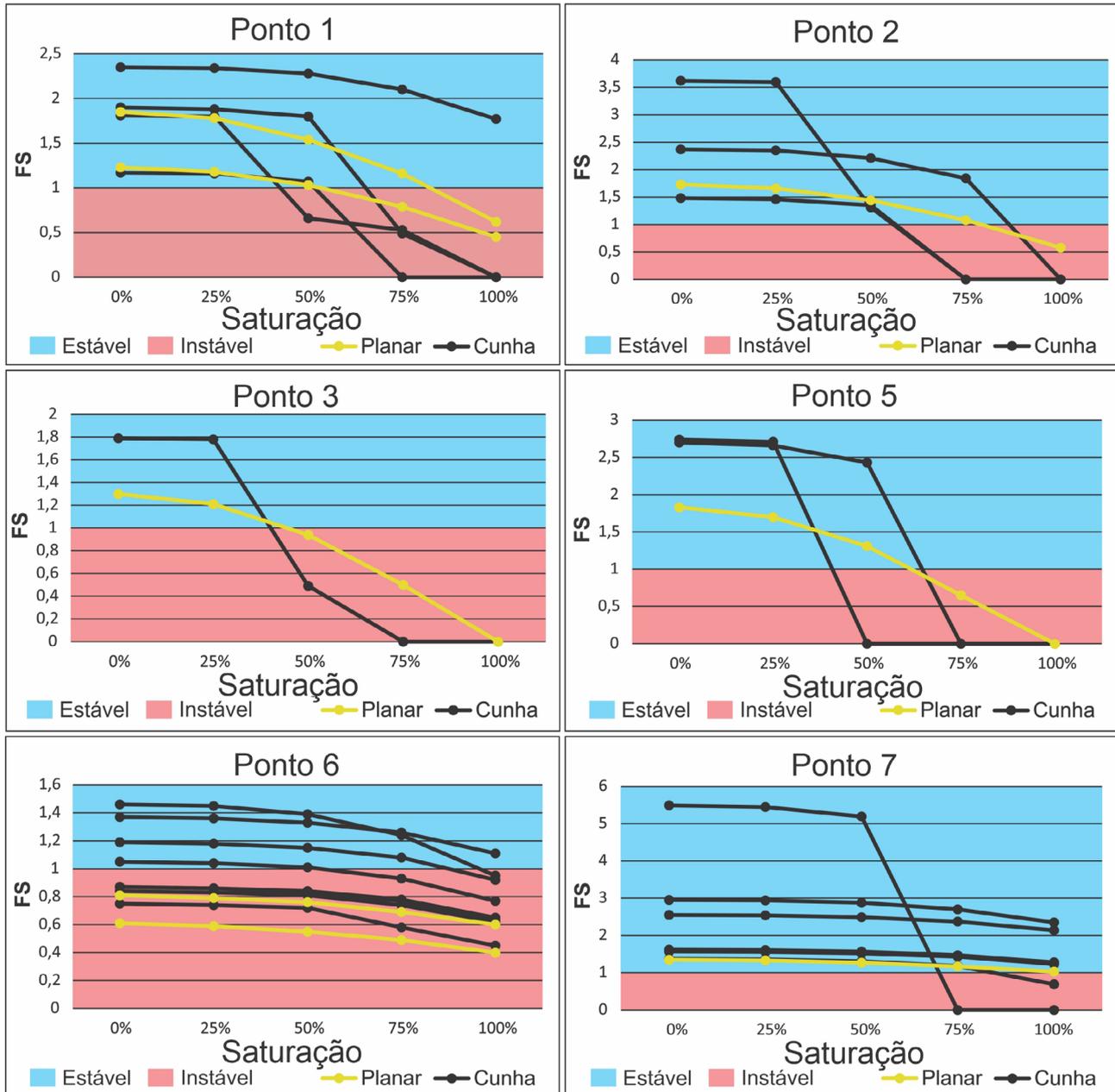


Figura 14. Gráficos de fator de segurança em relação à saturação para os seis taludes que podem apresentar problemas geotécnicos. As curvas em amarelo simbolizam deslizamento planar, e as curvas em preto, em curva. As áreas em azul são estáveis ($FS > 1,0$), e as em vermelho, instáveis ($FS < 1,0$).

DISCUSSÃO

De modo geral, a análise dos lineamentos estruturais mostrou-se semelhante para as duas escalas adotadas (1:250.000 e 1:750.000), com orientação preferencial máxima de direção ENE e, subordinadamente, NE e WNW. Os dados de campo com atitudes de alto ângulo mostraram essa direção preferencial, variando de N50-70E, muito bem definida no diagrama de rosetas.

Em trabalhos anteriores (Zalán et al., 1990; Machado et al., 2012; Nummer et al., 2014; Jacques et al., 2015; Santos, 2017) já se havia percebido que há falhas transcorrentes NE-SW destrais e NW-SE sinistras, com esforço máximo (σ_1) aproximadamente E-W durante o Holoceno, como demonstrado por Assumpção (1998) e Assumpção et al. (2016). Nesta pesquisa, apenas três falhas destrais (interpretadas como estruturas Y e R do modelo de fraturamento de Riedel, 1929) foram evidenciadas na pedreira Caxiense.

Contudo, mesmo com as direções máximas bem definidas pelos dados de campo, ao analisar pontualmente os diagramas dos taludes, percebe-se um padrão estrutural assimétrico. Os fatores que podem explicar essa discrepância são a distância entre os afloramentos, muitas vezes da ordem de dezenas de quilômetros, e a proximidade com lineamentos regionais, por exemplo, o ponto 5 (próximo a uma estrutura NW e com máximo nessa direção). Há outras explicações para as discrepâncias, por exemplo, a reologia, as propriedades geomecânicas distintas das rochas vulcânicas ácidas e básicas, ou, ainda, a posição stratigráfica dos maciços rochosos em relação aos derrames.

A Tabela 4 apresenta os problemas geotécnicos que podem ocorrer em cada talude, condicionados pelas estruturas máximas regionais, observadas na roseta dos lineamentos estruturais (Figura 3). A direção máxima (N70-90E) pode causar problemas geotécnicos em seis dos sete taludes estudados (17 movimentos distintos), visto que no ponto 4 não foi interpretada a existência de instabilidades. Já o segundo máximo (N60-80W) condiciona possíveis movimentos em quatro dos sete pontos (12 movimentos), e o terceiro (N20-40E) pode gerar problemas em apenas dois taludes da BR-116 (4 deslizamentos).

A direção e o rumo dos taludes são condicionantes essenciais para que os deslizamentos ocorram, mas caso eles mudem de direção, podem tornar as vertentes estáveis, dificultando e até bloqueando os movimentos de massa. Por esse motivo, nesta pesquisa, a correlação dos dados estruturais com os problemas geotécnicos foi feita com critério.

As famílias de fraturas N70-90E podem causar muitos movimentos de massa em razão do predomínio de deslizamentos em cunha, que não dependem tanto da direção da estrada quanto os planares, e sim da presença de outras descontinuidades que se interceptam na vertente do maciço. Esse fato pode ser observado na Figura 15, que mostra a compilação de todos os diagramas de interpretação de movimentos de massa, demonstrando que as mesmas estruturas podem deslizar em variadas direções dos taludes.

Com a análise conjunta da Tabela 4 e da Figura 15, fica evidente, portanto, que as estruturas regionais máximas

(N70-90E e N60-80W) podem condicionar os movimentos de massa observados na maioria dos taludes da BR-116, a nordeste do RS. No entanto, outras estruturas não tectônicas podem gerar instabilidades, por exemplo, disjunções de resfriamento com alto ângulo de mergulho, mas em menor escala do que os lineamentos regionais.

Ao analisar os taludes deste estudo (Tabela 3), percebe-se que 75% dos potenciais movimentos possíveis de ocorrer são deslizamentos em cunha, e a probabilidade desses deslizamentos acontecerem chega a ser quatro vezes maior em alguns taludes (Tabela 2). O predomínio dos deslizamentos em cunha em relação aos planares ocorre justamente pela grande variedade de famílias de fraturas evidenciadas nos taludes que se intersectam, sejam de alto ângulo, sejam de baixo ângulo. Esse fato é bem observado no ponto 6, que apresenta um total de nove famílias de fraturas, podendo condicionar até dez deslizamentos diferentes (oito em cunha e dois planares). Esse é considerado um talude crítico, visto que a média de movimentos de massa interpretados nos sete afloramentos é de 4,5.

Para o DNIT, os taludes rodoviários devem apresentar FS maior que 1,5, indicando que as forças resistentes são 50% maiores do que as cisalhantes (de maneira geral, o movimento está estável), garantindo a segurança dos motoristas que trafegam pela BR-116. A Tabela 5 apresenta a quantidade dos prováveis movimentos de massa que ocorrem nas condições secas, com saturações em água de 50 e 100%, para FS maiores que 1,5; entre 1,5 e 1,0; e menores que 1,0.

Na área de estudos, em condições secas (0% saturado), 53% dos movimentos estão com FS maiores que 1,5; 28%, entre 1,5 e 1,0; e 19%, abaixo de 1,0 (instáveis). Quando a saturação atinge 50%, a quantidade de movimentos é similar para os três cenários de FS. Entretanto, com a saturação máxima (100%), o FS é invertido, com 78% de movimentos instáveis (sendo que 12 apresentam valor zero) em relação aos estáveis ou no limite da estabilidade.

Esses resultados demonstram a importância da presença de água nas descontinuidades, sendo um dos principais condicionantes naturais para os movimentos de massa nos períodos de alta pluviosidade. Com a análise da Tabela 3, percebe-se que o FS dos movimentos começa a apresentar queda brusca quando a saturação ultrapassa 50%, geralmente atingindo valor zero quando condicionado por estruturas de alto ângulo de mergulho (maiores que 80°). Por outro lado, o FS dos deslizamentos causados por descontinuidades com médios ângulos de mergulho (abaixo de 60°) não se torna nulo, mesmo em condições extremas (100% de saturação).

A força neutra (U) exercida pela presença de água nas fraturas opõe-se à tensão normal sobre o plano, subtraindo-se das forças resistentes, abaixando os valores de FS à medida que a saturação aumenta. Quando esta atinge valor máximo, em teoria, o bloco superior flutua em relação ao inferior, perdendo o atrito e a coesão que impediam o movimento, tornando o risco de deslizamento extremamente alto.

Tabela 4. Problemas geotécnicos que os taludes podem apresentar, condicionados pelas três estruturas máximas regionais.

Talude	N70-90E	N60-80W	N20-40E
1	Sim	Sim	Não
2	Sim	Sim	Não
3	Sim	Não	Não
4	Não	Não	Não
5	Sim	Sim	Sim
6	Sim	Não	Não
7	Sim	Sim	Sim

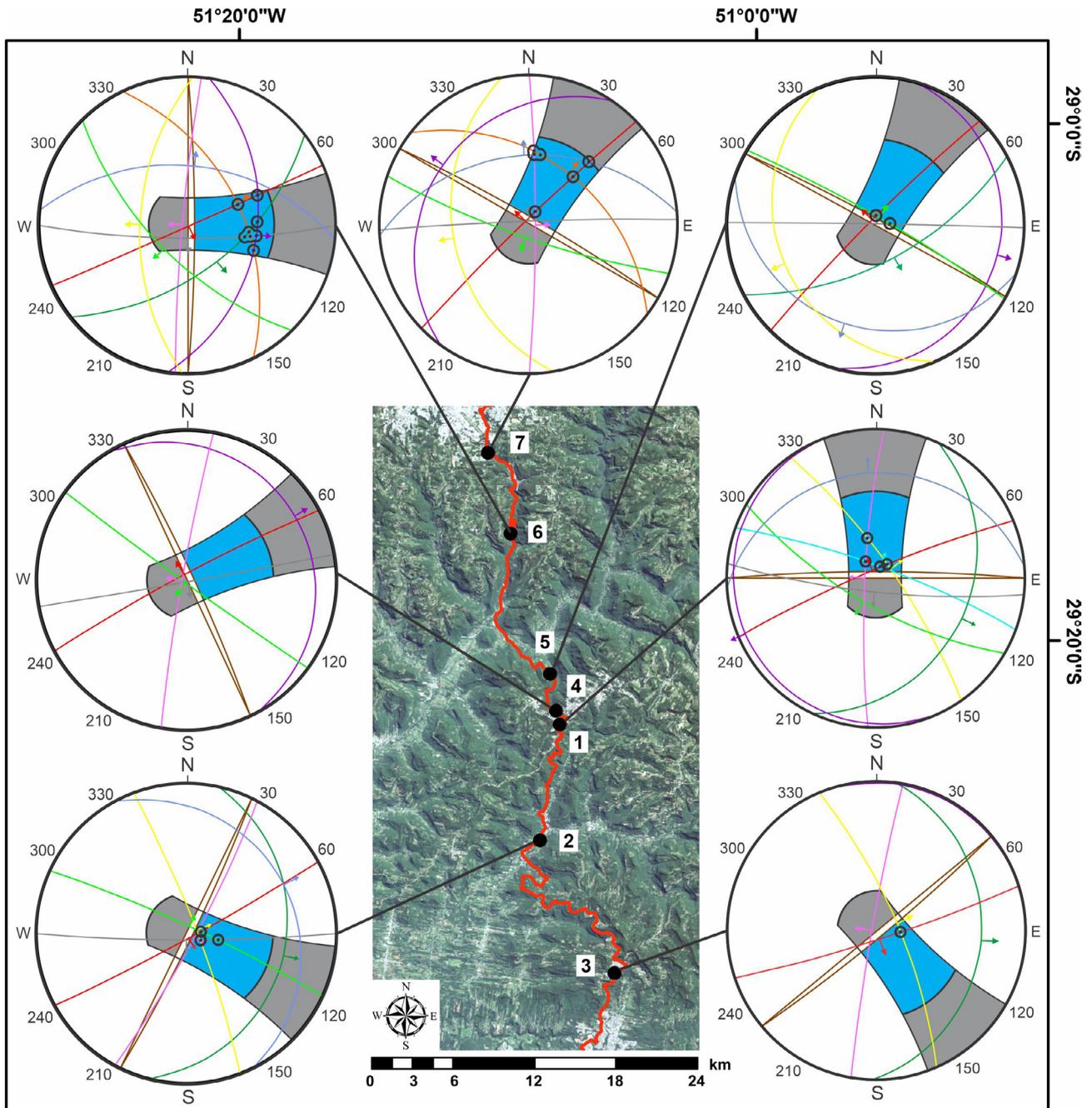


Figura 15. Diagramas de interpretação de movimentos de massa para os taludes da BR-116.

Tabela 5. Quantidade de prováveis movimentos de massa relacionados com a saturação em água das descontinuidades na área de estudo.

Saturação	FS > 1,5	FS 1,5 – 1,0	FS < 1,0
0%	53,12%	28,12%	18,76%
50%	31,25%	37,50%	31,25%
100%	9,38%	12,50%	78,12%

Após analisar a probabilidade de ocorrer movimentos de massa nos taludes (Tabela 2) e o resultado dos problemas geotécnicos potenciais (Tabela 3), é possível fazer uma correlação com deslizamentos observados em campo, a fim de verificar se os movimentos interpretados estão próximos da realidade da região (Figura 16). Diversos blocos caídos muito próximos da rodovia podem ser encontrados ao longo de toda sua extensão nesse trecho de serra, visto

que raramente a BR-116 apresenta espaço para acostamento ou recuo da pista.

A Figura 16A mostra, em detalhe, diversos blocos caídos no ponto 2, cujos movimentos interpretados possuem FS maior que 1,0 em condições médias de saturação (até 50%). Entretanto, ao atingir níveis entre 50 e 75%, o FS torna-se nulo e pode causar escorregamentos.

O ponto 3 apresenta apenas dois movimentos passíveis de ocorrer (um cunha e um planar), com FS abaixo de 1,0 quando a saturação se aproxima de 50%. Entretanto, no lado oposto da estrada, encontram-se diversos blocos caídos na beira da pista (Figura 16B). Esses movimentos estão ocorrendo porque esse talude apresenta condições favoráveis à queda e ao tombamento de blocos por gravidade, como



Figura 16. Diversos problemas geotécnicos evidenciados ao longo da BR-116: (A) detalhe de blocos caídos, ponto 2; (B) blocos tombados em talude com inclinação negativa, ponto 3; (C) cicatriz antiga de deslizamento planar, ponto 5; (D) talude que apresenta grande diversidade de famílias de fratura e alto risco de deslizamentos, ponto 6; (E) visão geral do ponto 6, com grande extensão de taludes concretados, em uma tentativa de estabilizar a vertente.

inclinação negativa e surgência natural de água entre suas descontinuidades nos dias de clima seco (Nadalin, 2018).

A Figura 16C ilustra uma cicatriz de deslizamento planar que ocorreu no talude do ponto 5, provavelmente criando transtornos ao longo de sua movimentação. Nesse talude, evidencia-se que o FS, tanto para cunha quanto para planar, é maior que 1,5 até atingir saturação de 50%, abaixando diretamente para zero com o acúmulo progressivo de água.

O ponto 6 é o mais perigoso desta pesquisa, com grande diversidade de famílias de fraturas (Figura 16D) que podem causar até dez possibilidades de movimentos distintos. Esse talude possui grande extensão e altura, com diversos trechos concretados ao longo da pista (Figura 16E), na tentativa de impedir os deslizamentos. O FS de seis movimentos interpretados nesse ponto encontra-se menor do que 1 já em condições secas de saturação (0%). Mesmo não atingindo valor de FS = 0 quando totalmente saturados em água (100%), esses movimentos são considerados extremamente instáveis e perigosos, com alto volume de material que pode atingir a estrada.

CONCLUSÕES

A análise dos lineamentos estruturais nas escalas 1:250.000 e 1:750.000 indica orientação preferencial máxima com direção ENE e, subordinadamente, NE e WNW. Os dados de campo com atitudes de alto ângulo mantêm essa direção máxima, N50-70E, porém os diagramas de roseta dos taludes se apresentam com forte padrão estrutural assimétrico. As informações cinemáticas das falhas destrais correspondem às estruturas Y e R do modelo de fraturamento de Riedel (1929), com direção de tensão máxima (σ_1) a E-W.

A BR-116 apresenta diversos problemas de movimentos de massa evidentes próximos da rodovia, e oferece grande risco aos motoristas que trafegam na região da Escarpa da Serra Geral. A direção e o rumo das faces livres dos taludes são essenciais para que os deslizamentos ocorram.

A direção máxima (N70-90E) pode causar problemas geotécnicos em seis dos sete taludes estudados, o segundo máximo (N60-80W) condiciona possíveis movimentos em quatro dos sete pontos, e o terceiro (N20-40E) pode gerar deslizamentos em apenas dois taludes da BR-116. As famílias de direção N70-90E podem causar movimentos de massa nas mais variadas direções da rodovia, onde 75% das quedas ocorrem por deslizamentos em cunha, condicionados por estruturas de alto ângulo de mergulho. Está evidente que as direções máximas dos lineamentos regionais são também as estruturas que mais podem causar os movimentos de massa nos taludes da BR-116 a nordeste do RS.

Os cálculos do FS indicam que, em condições secas, apenas 53% dos taludes estão de acordo com o mínimo exigido pelo DNIT para as rodovias do estado. Com o aumento da saturação, esse valor cai de forma brusca, e quando 100% saturado, 78%

dos possíveis movimentos apresentam-se instáveis. Os movimentos causados por estruturas de alto ângulo, seja em cunha, seja planar, geralmente apresentam FS = 0 quando a saturação está alta, tornando-os extremamente instáveis. De outra forma, o FS de estruturas com ângulos medianos não se torna nulo nessas mesmas condições extremas de saturação. Esses resultados demonstram a importância da presença de água nas descontinuidades como condicionante dos deslizamentos, principalmente nos períodos de alta pluviosidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Tecnológico de Transporte e Infraestruturas (ITTI) a infraestrutura e o apoio aos trabalhos de campo; à Fundação de Pesquisas Florestais (FUPEF) o apoio financeiro; e ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Agradecem também as contribuições dos geólogos Leonardo Mairink Barão e Francisco Tomio Arantes.

REFERÊNCIAS

- Almeida, F. F. M. (1967). *Origem e Evolução da Plataforma Brasileira*. Rio de Janeiro: DNPM/DGM.
- Almeida, F. F. M., Hasui, Y. (1984). Província Mantiqueira - Setor Setentrional. In: Almeida, F. F. M., Hasui, Y. (eds), *O pré-cambriano do Brasil* (p. 282-307). São Paulo: Edgard Blucher.
- Assine, M. L., Soares, P. C., Milani, E. J. (1994). Sequências tectosedimentares meso Paleozoicas da Bacia do Paraná, sul do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 24(2), 77-89.
- Assumpção, M. (1998). Seismicity and Stresses in the Brazilian Passive Margin. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(1), 160-169.
- Assumpção, M., Dias, F. L., Zevallos, I., Naliboff, J. B. (2016). Intraplate Stress Field in South America from Earthquake Focal Mechanisms. *Journal of South American Earth Sciences*, 71, 278-295. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.07.005>
- Bellieni, G., Comin-Chiaramonti, P., Marques, L. S., Melfi, A. J., Piccirillo, A. J. R. Roisemberg, A. (1984). High-and-low-TiO₂ flood basalts from the Paraná Plateau (Brazil): petrology and geochemical aspects bearing on their mantle origin. *Neues Jahrbuch fur Mineralogie*, 150(3), 273-306.
- Bieniawski, Z. T. (1974). Geomechanics classification of rock masses and its application to tunneling. *Congress on Rock Mechanics*, 2, 27-32. Denver.

- Chavez-Kus, L. G., Salamuni, E. (2008). Evidências da tenção N-S intraplaca no Neógeno. Complexo Atuba - região de Curitiba (PR). *Revista Brasileira de Geociências*, 38(3), 439-454. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2008383439454>
- Ernesto, M., Raposo, M. I. B., Marques, L. S., Renne, P. R., Diogo, L. A., De Min, A. (1999). Paleomagnetism, geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the North-eastern Paraná magmatic province: tectonic implications. *Journal of Geodynamics*, 28(4-5), 321-340. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(99\)00013-7](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(99)00013-7)
- Ferreira, F. J. F. (1982). *Integração de dados aeromagnéticos e geológicos: Configuração e evolução tectônica do Arco de Ponta Grossa*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/D.44.1983.tde-14082013-161535>
- Fiori, A. P., Carmignani, L. (2009). *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: Aplicação na estabilidade de taludes*. 2ª ed. Curitiba: Oficina de Textos.
- Freitas, R. C. (2005). *Análise estrutural multitemática do Sistema Petrolífero Irati - Rio Bonito, Bacia do Paraná*. Dissertação (Mestrado). Curitiba: Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná.
- Jacques, P. D. (2013). *Tectônica transcorrente mesozoica-cenozoica na borda leste da bacia do Paraná, estado de Santa Catarina*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.44.2013.tde-10012014-160608>
- Jacques, P. D., Machado, R., Nummer, A. R. (2010). Lineamentos estruturais na borda leste da Bacia do Paraná em Santa Catarina: análise multiescala com base em imagens LANDSAT e SRTM. *Pesquisas em Geociências*, 37(2), 117-131. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.22653>
- Jacques, P. D., Machado, R., Nummer, A. R. (2015). Análise estrutural da Formação Serra Geral na porção centro-sul do estado de Santa Catarina, Brasil. *Geociências*, 34(3), 390-401.
- Liu, C. C. (1984). *Análise estrutural de lineamentos em imagens de sensoriamento remoto: aplicação ao estado do Rio de Janeiro*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.44.1984.tde-25082015-143959>
- Machado, R., Roldan, L. F., Jacques, P. D., Fassbinder, E., Nummer, A. R. (2012). Tectônica transcorrente Mesozoica-Cenozoica no Domo de Lages - Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geociências*, 42(4), 799-811. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2012424799811>
- Milani, E. J. (1997). *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozoica do Gondwana sul-ocidental*. Tese (Doutorado). Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Milani, E. J., Melo, J. H. G., Souza, P. A., Fernandes, L. A., França, A. B. (2007). Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15, 265-287.
- Milani, E. J., Ramos, V. A. (1998). Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 28(4), 473-484. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1998473484>
- Nadalin, L. F. (2018). *Análise estrutural e geotécnica voltada à estabilidade de taludes e maciços rochosos na BR-116, Rio Grande do Sul (RS)*. Dissertação (Mestrado). Curitiba: Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2020). *Modelo Digital de Elevação (MDE) SRTM*, com resolução espacial de 30 m. Disponível em: <<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>. Acesso em: 06 dez. 2020.
- Nummer, A. R., Machado, R., Jacques, P. D. (2014). Tectônica transcorrente mesozoica/cenozoica na porção leste do Planalto do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 41(2), 121-130. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.78078>
- O'Leary, D. W., Friedman, J. D., Pohn, H. A. (1976). Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. *Geological Society American Bulletin*, 87(10), 1463-1469. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1976\)87<1463:LLLSPN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1976)87<1463:LLLSPN>2.0.CO;2)
- Pariseau, W. G. (2011). *Design Analysis in Rock Mechanics*. 2ª ed. Londres: CRC Press.
- Peate, D. W., Hawkesworth, C. J., Mantovani, M. S. (1992). Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. *Bulletin of Volcanology*, 55(1-2), 119-139. <https://doi.org/10.1007/BF00301125>
- Queiroz, G. L., Salamuni, E., Nascimento, E. R. (2014). AzimuthFinder: ferramenta para a extração de dados e apoio na análise estrutural. *Geologia USP. Série Científica*, 14(1), 69-80. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X201400010005>

- Riccomini, C. (1995). *Tectonismo gerador e deformador dos depósitos sedimentares pós-gondvânicos da porção centro-oriental do Estado de São Paulo e áreas vizinhas*. Tese (Livres-Docência). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.44.2013.tde-03062013-103524>
- Riedel, W. (1929). Zur mechanik geologischer brucherscheinungen. Ein beitrag zum problem der fiederspalten. *Zentralblatt für Mineralogie*, 354-368.
- Robertson, A. M. (1970). The interpretation of geological factors for use in slope theory. *Planning Open Pit Mines*, 55-71. Johannesburg.
- Roldan, L. F. (2007). *Tectônica Ríptil Meso-Cenozóica na Região do Domo de Lages, SC*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/D.44.2007.tde-31072007-155414>
- Rostirolla, S. P., Assine, M. L., Fernandes, L. A., Artur, P. C. (2000). Reativação de paleolineamentos durante a evolução da Bacia do Paraná - o exemplo do alto estrutural de Quatiguá. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(4), 639-648. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2000304639648>
- Santos, J. M. (2017). *Análise morfotectônica e estrutural da região centro-leste de Santa Catarina (SC)*. Dissertação (Mestrado). Curitiba: Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná.
- Scheibe, L. F., Kawashita, K., Gomes, C. B. (1985). Contribuição à geocronologia do Complexo Alcalino de Lages, SC. *II Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia*, 299-307.
- Soares, A. P., Soares, P. C., Bettú, D. F., Holz, M. (2007). Compartimentação estrutural da Bacia do Paraná: a questão dos lineamentos e sua influência na distribuição do Sistema Aquífero Guarani. *Geociências*, 26(4), 297-311.
- Soares, P. C., Barcellos, P. E., Csordas, S. M., Mattos, J. T., Balieiro, M. G., Meneses, P. R. (1982). Lineamentos em imagens de Landsat e Radar e suas implicações no conhecimento tectônico da Bacia do Paraná. *II Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 143-156.
- Stewart, K., Turner, S., Kelley, S., Hawkesworth, C. J., Kirstein, L., Mantovani, M. S. M. (1996). 3-D, ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology in the Paraná continental flood basalt province. *Earth and Planetary Science Letters*, 143(1-4), 95-109. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(96\)00132-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(96)00132-X)
- Strugale, M., Rostirolla, S. P., Mancini, F., Portela Filho, C. V., Ferreira, F. J. F., Freitas, R. C. (2007). Structural framework and Mesozoic-Cenozoic evolution of Ponta Grossa Arch, Paraná Basin, southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 24(2-4), 203-227. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2007.05.003>
- Thiede, D. S., Vasconcelos, P. (2010). Paraná flood basalts: rapid extrusion hypothesis confirmed by new ⁴⁰Ar-³⁹Ar results. *Geology*, 38(8), 747-750. <https://doi.org/10.1130/G30919.1>
- Turner, S., Regelous, M., Kelley, S., Hawkesworth, C., Mantovani, M. (1994). Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 121(3-4), 333-348. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(94\)90076-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(94)90076-0)
- United States Geological Survey (USGS) (2020). *Satellite Landsat-8 OLI (resolução 15 m)*, composto de oito bandas com comprimentos de ondas distintos, produzido em conjunto com a NASA. Disponível em: <www.usgs.gov/landsat>. Acesso em: 06 dez. 2020.
- Viero, A. C., Silva, D. R. A. (2010). *Geodiversidade do estado do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: CPRM.
- White, I. C. (1908). *Relatório sobre as Coal Measures e rochas associadas ao sul do Brasil*. Relatório final da comissão dos estudos das minas de carvão de pedra do Brasil. Rio de Janeiro.
- Wilcox, R. E., Harding, T. P., Seely, D. R. (1973). Basin wrench tectonics. *Bulletin American Association of Petroleum Geologists*, 57(1), 74-96. <https://doi.org/10.1306/819A424A-16C5-11D7-8645000102C1865D>
- Wildner, W. (2004). Estratigrafia do magmatismo Serra Geral na Bacia do Paraná-Conceitos básicos e divisão faciológica. *Reunião Aberta da Comissão Brasileira de Estratigrafia*, 62-78.
- Wildner, W. (2006). *Mapa Geológico do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre (RS). Escala 1:750.000. Porto Alegre: Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais.
- Zalán, P. V., Wolff, S., Conceição, J. C., Marques, A., Astolfi, M. A. M., Vieira, I. S., Appi, V. T. (1990). Bacia do Paraná. In: G. P. R. Gabaglia, E. J. Milani (eds.), *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*, p. 135-164. Rio de Janeiro: Petrobras.
- Zalán, P. V., Wolff, S., Conceição, J. C. J., Vieira, I. S., Astolfi, M. A. M., Appi, V. T., Zanotto, O. A. (1987). A divisão tripartite do Siluriano da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 17(3), 242-252. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1987242252>