

ESTABILIDADE DE TALUDES ROCHOSOS EM RODOVIAS: ANÁLISE DA COMPARTIMENTAÇÃO ESTRUTURAL DE MACIÇOS

Stability of Rock Slopes on Highways: Analysis of Mass Structural Compartmentation

Carolina Bitencourt de Britto^a, Alberto Pio Fiori^a

^a Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Brasil

RESUMO – Há um histórico de eventos de escorregamentos e processos erosivos ocorrentes em gnaisses fraturados localizados em um trecho da Rodovia Régis Bittencourt na Serra do Azeite, Cajati/SP. Buscou-se determinar a influência das estruturas em rocha no processo de escorregamento, através do estudo geométrico do maciço e da caracterização geoestrutural voltada para instabilizações. As principais estruturas que regem o comportamento do maciço são as famílias de fraturas N15E/78NW e N30W/80SW, que são planos mais propícios a escorregamentos tanto planares como em cunha devido a geologia local e ao corte dos taludes. Verificou-se que as encostas possuem alta suscetibilidade a escorregamentos planares mesmo quando não estão saturadas por água, e baixa suscetibilidade a escorregamentos em cunha quando secas, porém há risco de movimentação do bloco da cunha quando estão na presença de água. O uso de um modelo de análise da compartimentação estrutural dos maciços, aplicado no trecho aflorante da Serra do Azeite, auxiliou na compreensão das estruturas que regem a suscetibilidade à escorregamentos das encostas rochosas, sendo uma ferramenta de auxílio para o gerenciamento de riscos dos taludes rodoviários.

ABSTRACT – There is a history of landslide events and erosion processes occurring in fractured gneisses located on a stretch of the Régis Bittencourt Highway in Serra do Azeite, Cajati / SP. The objective of this study was to determine the influence of rock structures on the landslide process, through the geometric study of the massif and the geostructural characterization focused on instability. The main structures governing the behavior of the massif are the N10-20E/75NW and N15-30W/70SW fracture families, which are more conducive to both planar and wedge landslides due to local geology and slope cutting. The slopes have been found to be highly susceptible to planar landslides even when not saturated by water, and low susceptibility to wedge landslides when dry, but there is a risk of wedge block movement when in the presence of water. The use of an analysis model of the structural partitioning of the massifs, applied in the outcrop of Serra do Azeite, helped to understand the structures that govern the susceptibility to slopes of the rocky slopes, being an aid tool for risk management of road slopes.

Palavras Chave – Estabilidade de taludes rochosos, Escorregamentos, Serra do Azeite.

Keywords – Rock slope stability, landslides, Serra do Mar.

1 – INTRODUÇÃO

Escorregamentos, quedas de blocos e processos erosivos são fenômenos frequentes em taludes rodoviários de regiões serranas. Muitos estudos vêm sendo desenvolvidos nesse tema a fim de obter-se o entendimento da gênese de formação desses processos para identificar os possíveis locais suscetíveis a instabilizações, e assim, poder prevenir futuros eventos de movimentação de massas.

E-mails: carolinabitencourt.geo@gmail.com (C. Britto), alberto.fiori@yahoo.com.br (A. Fiori)

A instabilidade dos taludes é consequência da própria dinâmica de evolução das encostas, que através de processos intempéricos torna o material rochoso suscetível a redução de sua resistência (Gerscovich, 2012).

A caracterização do maciço rochoso, quanto ao seu grau de alteração e a presença de descontinuidades, associada a análise de percolação de água são os principais fatores que influenciam no comportamento do talude frente aos mecanismos de ruptura (Parizzi et al., 2009).

As estruturas presentes na rocha são determinantes para a ocorrência dos escorregamentos, e através da caracterização destas e da definição dos parâmetros de resistência do maciço é avaliado comumente a condição de estabilidade do talude rochoso pelo método de equilíbrio limite.

Os taludes rochosos apresentam estruturas intrínsecas a sua formação que condicionam o desenvolvimento de planos de fraqueza e que são suscetíveis a escorregamentos quando o limite da resistência ao cisalhamento é alcançado. Para avaliar a suscetibilidade a deslizamentos realizou-se o mapeamento das principais estruturas aflorantes ao longo do talude, como a foliação e as famílias de fraturas.

A análise da compartimentação estrutural do maciço, através da caracterização geoestrutural voltada para instabilizações e da definição do padrão de ruptura do maciço foi empregada em um estudo de caso em um trecho da Rodovia Régis Bittencourt (BR-116) localizado na Serra do Azeite, em Cajati/SP. Nesta serra, há um histórico de eventos de instabilização ocorrentes no maciço gnáissico fraturado, como desprendimentos de blocos e indícios de escorregamentos.

A determinação das condições de estabilidade, e o mapeamento das áreas suscetíveis a escorregamentos são imprescindíveis para a tomada de decisões e a definição de medidas para garantir a segurança das vias de grande tráfego.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

A avaliação da estabilidade de taludes rochosos é feita considerando-se o tipo de rocha, a geometria dos blocos rochosos, que dependem do padrão da orientação espacial das descontinuidades presentes no maciço, e a direção das seções dos taludes. A ruptura do talude só ocorrerá se o movimento for em direção a face livre do talude.

Os movimentos de blocos em maciços rochosos podem ser divididos em escorregamentos planares, escorregamentos em cunha e tombamentos de blocos (*toppling*).

Os escorregamentos planares ocorrem ao longo de superfícies inclinadas que aflorem na direção da face livre da vertente e que, de acordo com Fiori e Carmignani (2015), atendam a duas condições: o ângulo de inclinação do plano de deslizamento for maior que o ângulo de atrito da superfície e menor que o ângulo da inclinação da face livre do talude, admitindo-se uma variação de 20 graus em torno da direção do mergulho do plano.

Segundo os mesmos autores, na intersecção entre dois planos pode se desenvolver uma cunha. Para que essa cunha seja instável, a linha de intersecção deverá aflorar na face livre do talude a uma inclinação superior ao ângulo de atrito e a um ângulo menor que a inclinação do talude. Para que ocorra o tombamento de blocos, é necessário que duas famílias de descontinuidades se interceptem, uma com ângulos de mergulho altos contra a face livre do talude e outra com baixos ângulos na direção do talude (Fiori e Carmignani, 2015).

A análise da estabilidade dos taludes rochosos aflorantes ao longo da rodovia foi feita usando-se a metodologia descrita em Fiori e Carmignani (2015), na qual é levada em consideração as condições favoráveis para o desenvolvimento de rupturas, citadas anteriormente, e o desenvolvimento de uma análise geométrica das descontinuidades presentes no maciço. Para isso considera-se as direções dos planos de descontinuidades e da face da vertente em um diagrama de interpretação, contendo o cone de atrito dimensionado em função do ângulo de fricção da face livre do talude, admitindo-se uma variação de direção do plano em 20 graus.

No diagrama de interpretação da Figura 1, as áreas em cinza representam áreas de instabilidades para tombamentos de blocos e aquelas em azul, as áreas com possibilidade de escorregamentos planares e em cunha.

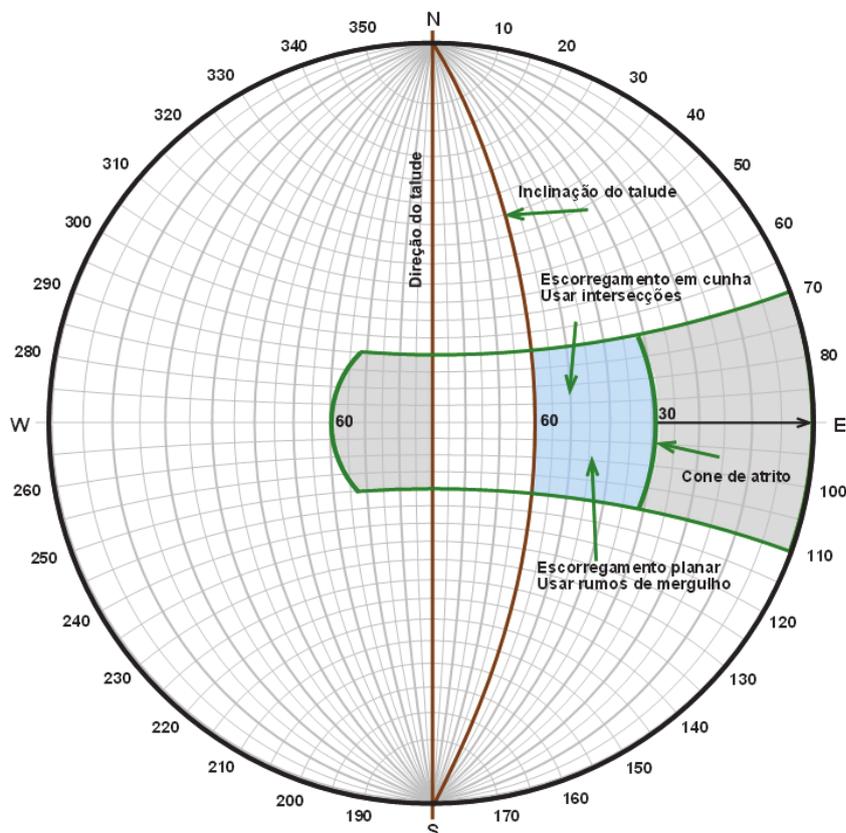


Fig. 1 – Diagrama de interpretação, tendo por base o diagrama de Wulf. Modificado de Fiori (2016).

Com a definição da compartimentação estrutural do maciço e a determinação dos planos suscetíveis a movimentação, pode-se calcular o fator de segurança para o talude rodoviário e definir as medidas de contenção a serem tomadas.

Os taludes rochosos são considerados taludes finitos, contendo altura, base e topo definidos, tendo a sua estabilidade dependente da resistência ao cisalhamento ao longo do plano em que ocorrerá o escorregamento, fundamentado no critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Quando a tensão de cisalhamento iguala ou ultrapassa a resistência, os materiais perdem sua estabilidade e ocorre o deslocamento, gerando os movimentos de massa (Guidicini e Nieble, 1984).

Segundo Fiori (2016), o fator de segurança, considerando taludes sem fenda de tração e com presença de água nos planos de ruptura, é dado por:

$$F_s = \frac{cA + (P \cos \theta - U) \tan \phi}{P \sin \theta} \quad (1)$$

Na equação acima, c e ϕ são a coesão e o ângulo de fricção no plano de escorregamento, P corresponde ao peso do bloco instável, θ é o ângulo de inclinação do plano de escorregamento, U é a força resultante das pressões da água atuante no plano de escorregamento, enquanto A é a área do plano de escorregamento, sendo dada por:

$$A = \frac{H_w}{\text{sen } \theta} \quad (2)$$

Na equação acima H_w é a altura do nível de água em relação à base do talude.

O peso P do bloco instável é dado pela multiplicação do volume pelo peso específico do material, conforme a equação abaixo, onde H é a altura do talude, i é o ângulo de inclinação da face livre do talude e γ é o peso específico da rocha:

$$P = \frac{1}{2} \gamma H^2 (\cot g \theta - \cot g i) \quad (3)$$

A força U atuante na base do bloco é dada pela área baseada na altura correspondente a pressão da água sobre a descontinuidade em seu ponto médio, multiplicada pelo peso específico da água (γ_a):

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

O Fator de Segurança para rupturas em cunha foi calculado com o auxílio do programa *Wedge Failure Analysis* (Kroeger, 1999), devido a análise ser mais complexa do ponto de vista matemático, pois considera a variação da coesão e da pressão da água atuantes ao longo dos planos de escorregamento, permitindo assim uma avaliação mais precisa do Fator de Segurança.

Para os cálculos, considerou-se um ângulo de atrito de 30° , normalmente adotado para rochas cristalinas, a exemplo de gnaisses, granitos e migmatitos, e da boa qualidade dos maciços rochosos analisados. A coesão e o peso específico dos maciços utilizados para o cálculo foi, respectivamente, de 40 kPa e 27 kN/m³, que são valores médios empregados em rochas cristalinas.

Os taludes analisados ao longo da BR-116 possuem alturas de 16 a 30 m e inclinações de aproximadamente 80° , nos quais foram mapeados as principais estruturas aflorantes ao longo dos taludes, como a foliação e as famílias de fraturas presentes nas rochas da Serra do Azeite.

3 – HISTÓRICO DE EVENTOS DE INSTABILIZAÇÃO NA REGIÃO

Na Serra do Azeite há um histórico de eventos de instabilização relatados pela concessionária, como processos erosivos, deslizamento de solos, ocorrência de trincas e/ou desprendimento de blocos. Realizou-se o inventário dessas instabilizações, provenientes do relatório de monitoramento da concessionária dos anos de 2013 a 2016, em conjunto com o mapeamento de cicatrizes de escorregamentos, obtidos através da análise de imagens de satélites disponíveis no software Google Earth.

Verificou-se que no trecho estudado houve dezessete ocorrências de eventos instabilizadores, e dentre estes, foram relatados desprendimentos de blocos e indícios de escorregamentos localizados em três dos taludes analisados. Na Figura 2 pode ser visualizada a localização dos taludes rochosos estudados e as ocorrências de instabilização ao longo do trecho da BR-116 correspondente a Serra do Azeite.

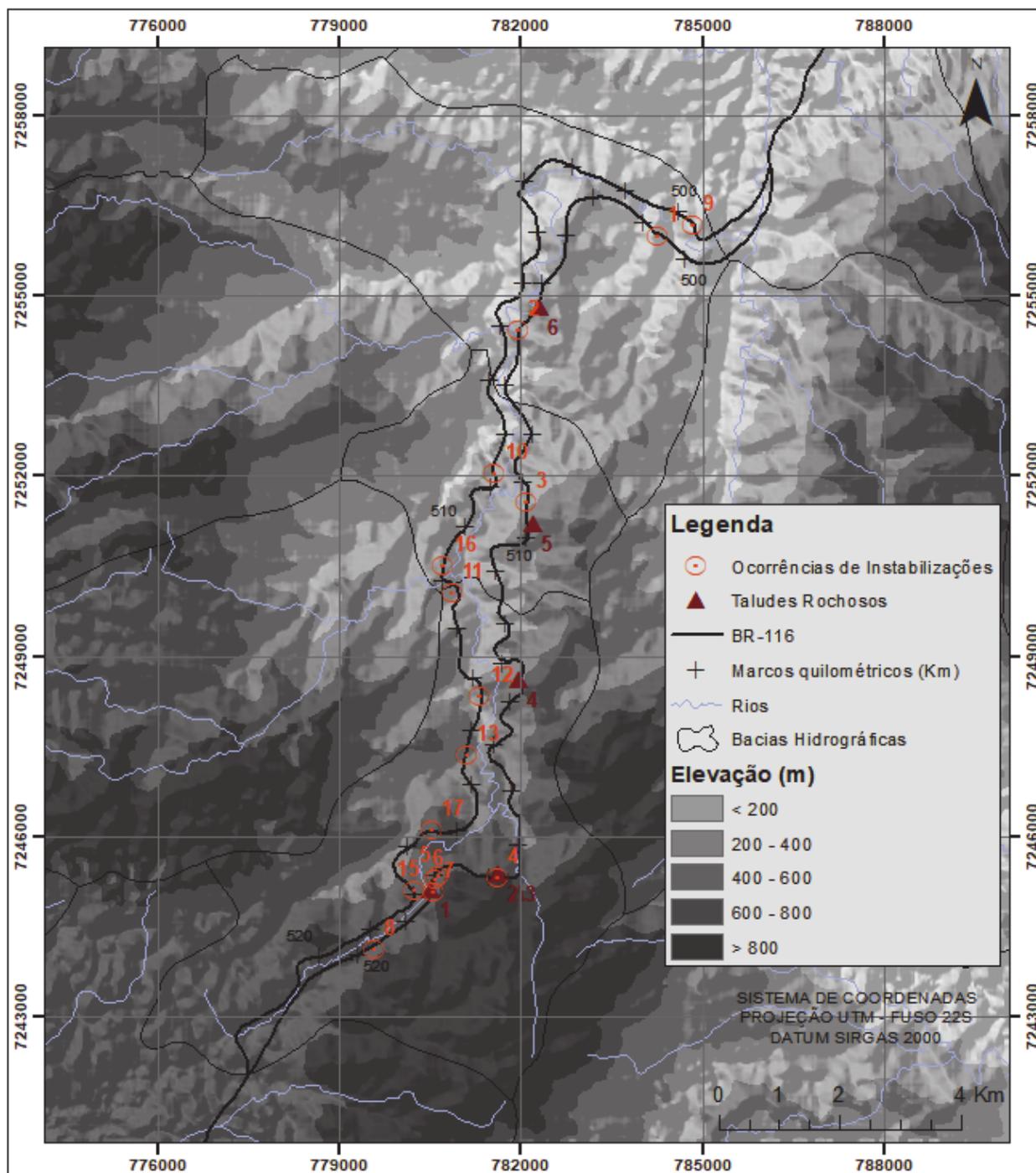


Fig. 2 – Localização dos taludes rochosos e das ocorrências de instabilizações.

4 – CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DOS TALUDES

O maciço aflorante ao longo da Serra do Azeite é composto por gnaisses bandados acinzentados, constituídos por quartzo e plagioclásio, hornblenda e secundariamente biotita. Possui granulação fina a média, localmente grossa, e bandamento gnáissico bem definido, formado pela intercalação de níveis quartzo-feldspáticos e níveis de minerais máficos. O bandamento apresenta espessuras variáveis, sendo observados níveis milimétricos a centimétricos, podendo alcançar camadas com até 50 cm de espessura. Na Figura 3 pode ser visto um talude da rodovia expondo o maciço gnáissico com bandamento bem marcado e de espessura centimétrica.



Fig. 3 – Talude mostrando o bandamento gnáissico centimétrico.

Foram observados paralelamente ao bandamento gnáissico planos de foliação, bem desenvolvidos e contínuos, com indícios locais de milonitização. Veios quartzo-feldspáticos centimétricos são comumente encontrados paralelos ou truncando esta foliação. Na área também ocorrem paragnaises cinzas de granulação fina a média com bandamento centimétrico, sendo comum a presença de dobras intrafoliares isoclinais e boudans alongados desenvolvidos ao longo da gnaissificação. Esses boudans são geralmente formados por quartzo e ultramáficos, e possuem comprimentos de até 10 cm. Na Figura 4, é possível observar essas feições em um afloramento de paragnaisse.



Fig. 4 – Paragnaisse com boudans de quartzo e ultramáfico.

4.1 – Compartimentação Estrutural do Maciço

A foliação milonítica presente nos maciços da região possui direções entre N70E a N85E, com mergulhos variando de 70° para NW a 50° para SE (Figura 5 – a). Os maciços rochosos da área de estudo possuem três famílias principais de fraturas, as quais são persistentes ao longo dos afloramentos, e, também ocorrem outras três famílias de fraturas menos expressivas na região, conforme pode ser visto na Figura 5 - b.

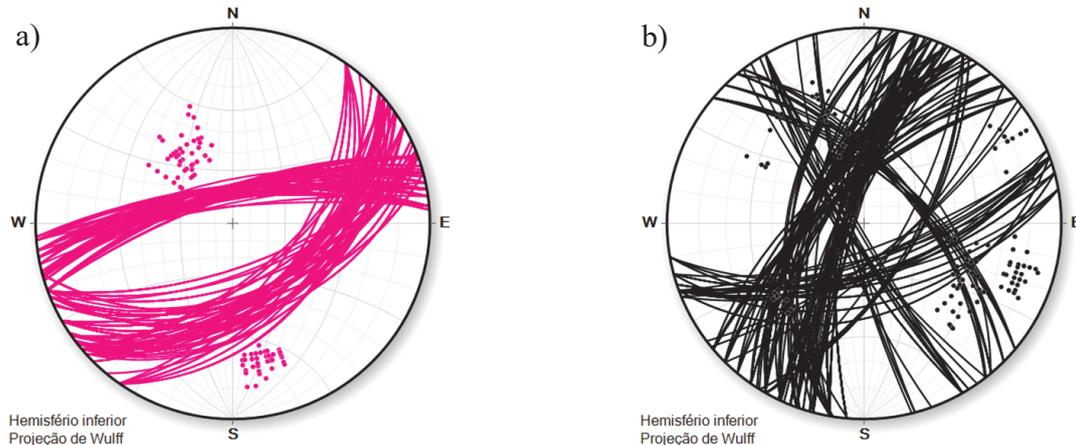


Fig. 5 – a) Planos de foliação e b) Fraturas.

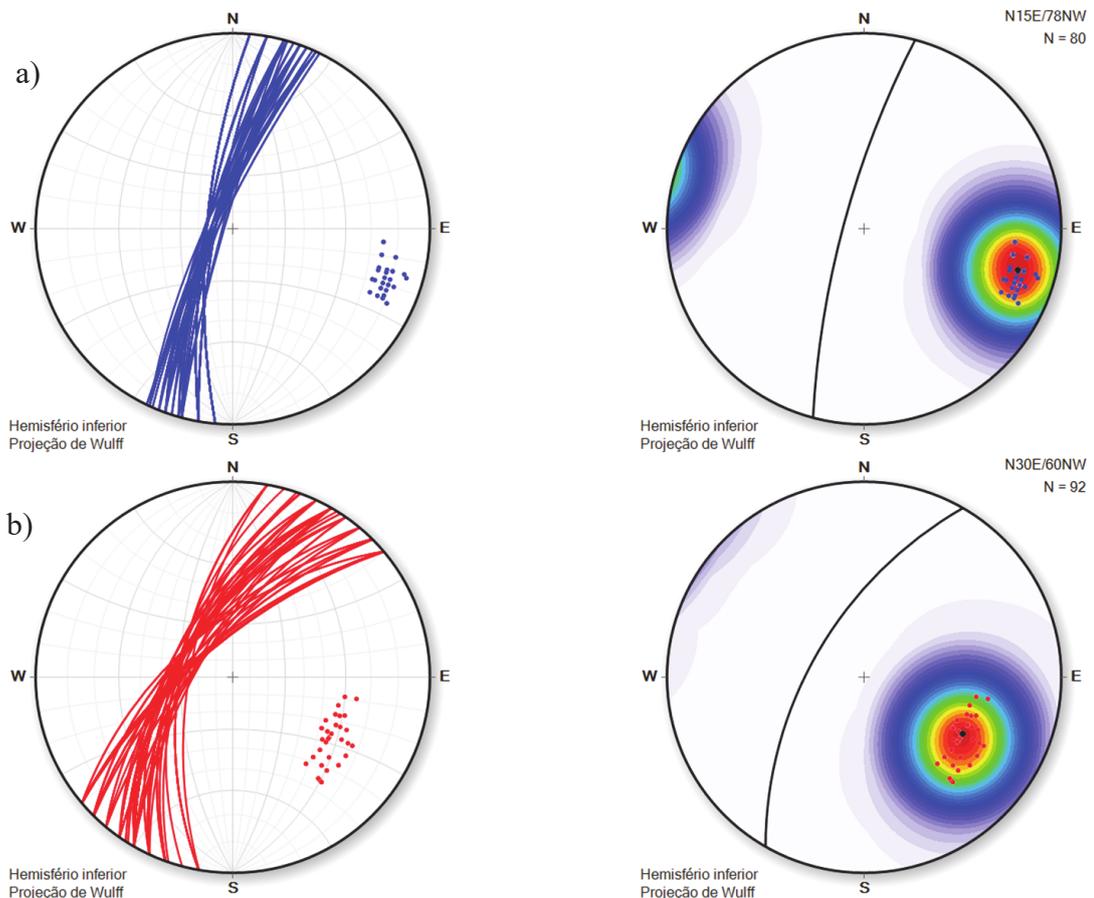


Fig. 6 – a) Família 1 e b) Família 2.

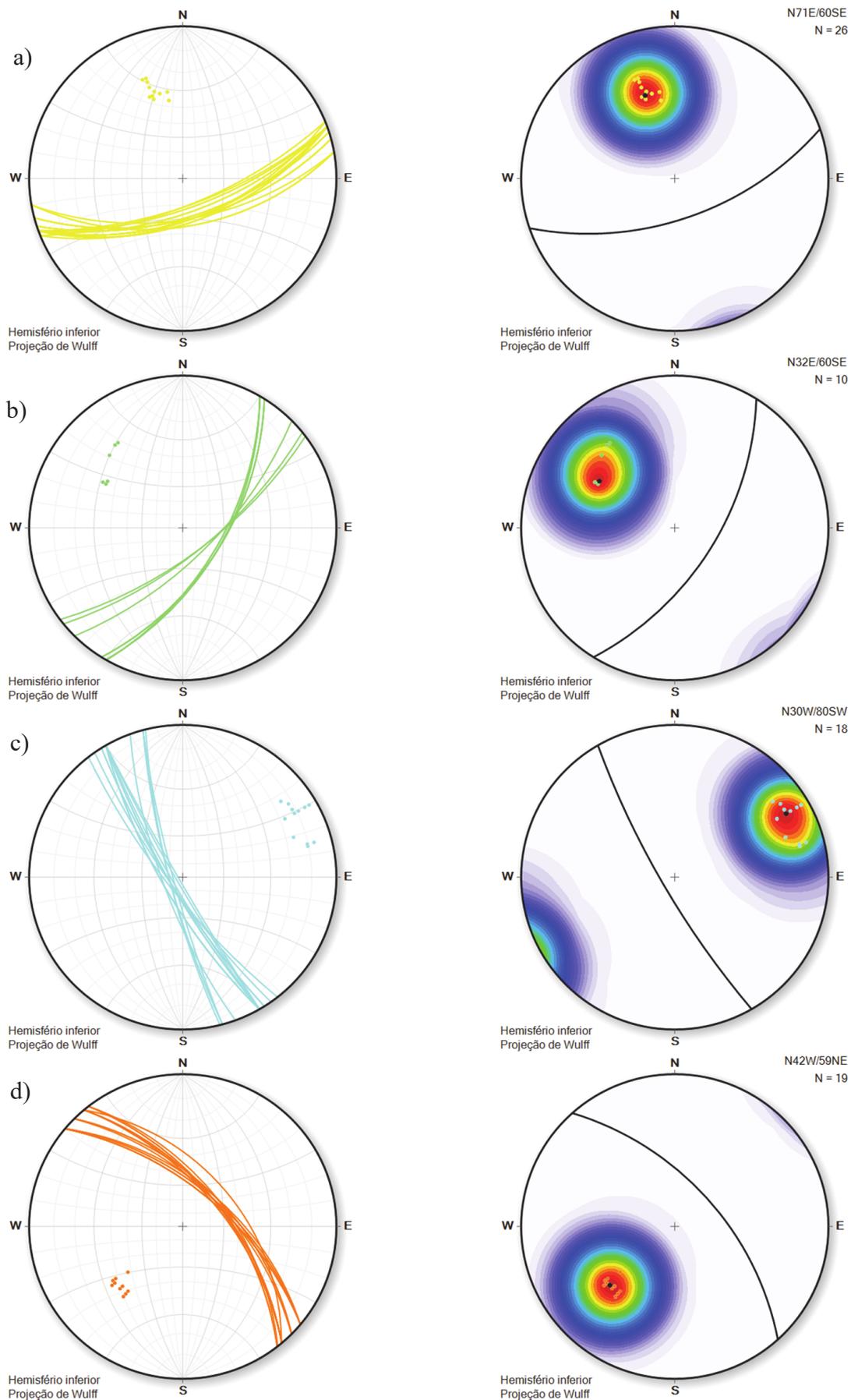


Fig. 7 – a) Família 3, b) Família 4, c) Família 5 e d) Família 6.

A família 1 é persistente em todos os taludes do trecho estudado, e é caracterizada por uma superfície lisa, com espaçamento curto, que cruza os planos de foliação. A atitude média deste plano é N15E/78NW (Figura 6 - a). Já a família 2 ocorre somente em alguns pontos e disposta com maior espaçamento, mas de forma persistente, apresenta atitude média de N30E/60NW (Figura 6 - b) e possui superfície lisa.

Localmente é encontrado a família 3, de distribuição irregular e superfície plana, que possui mergulhos que variam de 50° a 70° para SE, com direção entre N70-80E. A atitude média desta família é N71E/60SE (Figura 7 - a). Ocorre ainda, restrita a alguns pontos a família 4 de direção N32E/60SE (Figura 7 - b) e a família 6 de atitude média N42W/60NE (Figura 7 - d). Ambas essas descontinuidades são espaçadas e planas.

Em alguns taludes foi encontrado de forma penetrativa a família 5, que se apresenta quase que perpendicularmente aos planos da foliação, possuindo direção média N30W/80SW (Figura 7 - c). As fraturas desta família são geralmente contínuas e com espaçamento curto, possuindo superfície lisa.

Nos taludes expostos da rodovia verificou-se que, geralmente, os planos dessas famílias de fraturas apresentam-se pouco alterados, sem preenchimento e fechadas, em contato rocha a rocha.

Os planos médios das famílias de fraturas e da foliação são mostrados na Figura 8 em um mesmo estereograma estrutural, podendo serem vistas as intersecções entre esses planos.

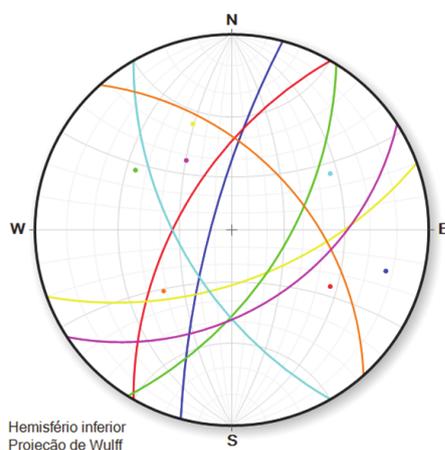


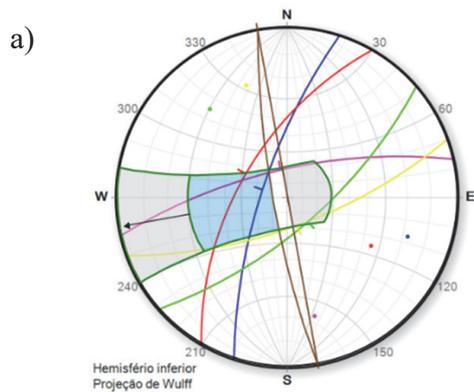
Fig. 8 – Planos médios das famílias de fraturas e da foliação.

5 – RESULTADOS

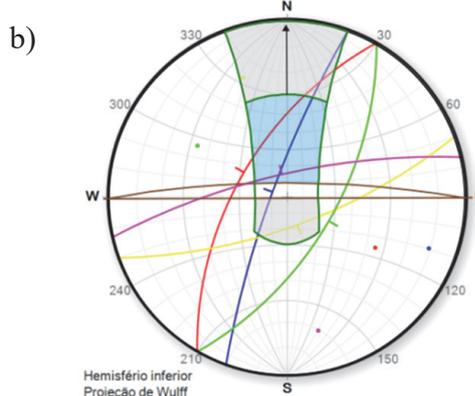
A suscetibilidade à escorregamentos planares nos taludes gnáissicos da Serra do Azeite estão intrinsicamente relacionadas aos planos das fraturas da família 1 e 5. Na Figura 9 são apresentados os diagramas de interpretação para os taludes, nos quais são verificadas as ocorrências de escorregamentos planares associados a família 1 e 5 nos diagramas a, d, e. Restrita a um ponto, verificou-se que a família 3 de direção NE com mergulho para SE apresenta potencial para o desenvolvimento de planos de ruptura (Figura 9 - c), assim como a foliação (Figura 9 - b).

Escorregamentos em cunha estão associados principalmente a intersecção dos planos de foliação com as fraturas da família 1 e 2 que possuem direção NE com mergulhos para NW (Figura 9 - a e b), e da família 5 de direção NW mergulhando para SW (Figura 9 - e). Também há possibilidade de cunha associada as fraturas da família 5 quando intersecta os planos da família 1 (Figura 9 - d, e).

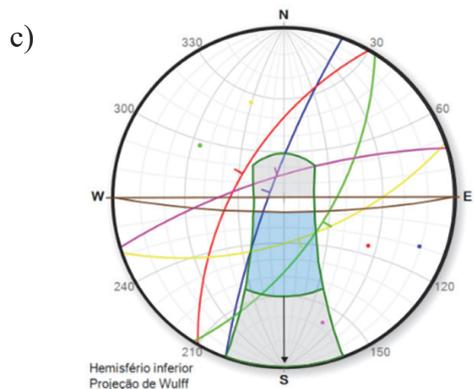
Podem ocorrer escorregamento em cunha associado à intersecção dos planos da família 3 com a família 6 (Figura 9, f), que são famílias de fraturas menos expressivas na área. Não há risco de tombamento de blocos em nenhum dos taludes analisados. Taludes negativos podem ocorrer associados a foliação e a família 1 (Figura 9 - c, f).



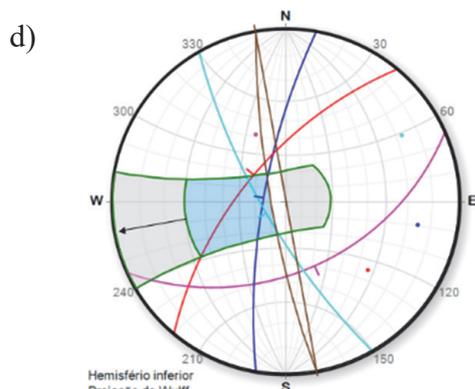
Família	Cor	Atitude	N
Sn		N77E/71NW	31
1		N19E/73NW	11
2		N30E/59NW	8
3		N70E/70SE	6
4		N49E/69SE	4



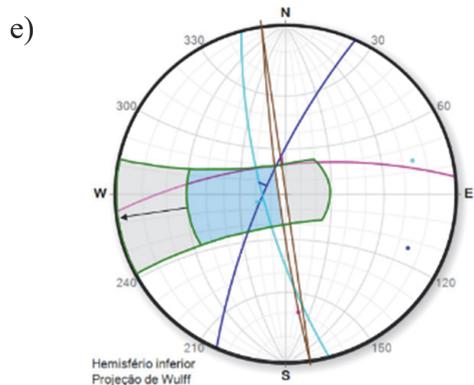
Família	Cor	Atitude	N
Sn		N77E/75NW	31
1		N20E/80NW	8
2		N30E/59NW	10
3		N70E/71SE	7
4		N30E/60SE	3



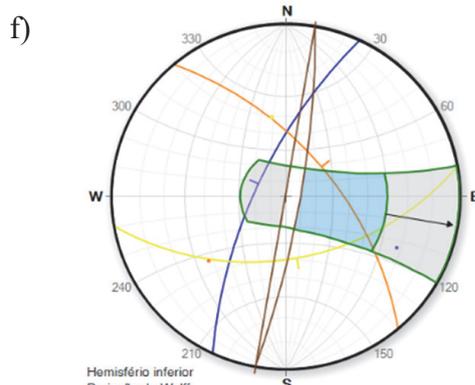
Família	Cor	Atitude	N
Sn		N73E/75NW	22
1		N20E/80NW	6
2		N30E/59NW	8
3		N71E/72SE	7
4		N32E/60SE	4



Família	Cor	Atitude	N
Sn		N66E/46SE	37
1		N10E/75NW	9
2		N40E/63NW	24
5		N30W/75SW	12



Família	Cor	Atitude	N
Sn		N84E/70NW	21
1		N24E/76NW	21
5		N15W/75SW	5



Família	Cor	Atitude	N
1		N25E/70NW	6
3		N80E/50SE	5
6		N40W/60NE	9

Fig. 9 – Diagramas de interpretação para os taludes. a) Talude de direção N10W/80SW, b) Talude EW/80N, c) Talude EW/80S, d) Talude N10W/80SW, e) Talude N8W/85SW, f) Talude 10E/80SE.

Os taludes com suscetibilidade a escorregamentos planares apresentaram fatores de segurança na condição seca (FS 1) entre 1,1 - 1,6, e com água (FS 2) varia de 0,8 a 1,3. Em taludes rodoviários, o fator de segurança mínimo exigido é 1,5. Nessa condição, o talude com percolação de água apresenta-se suscetível a escorregamento.

Para a ruptura em cunha, considerou-se dois cenários condicionantes nas discontinuidades, secas (FS1) e saturadas (FS2). Na condição seca os fatores de segurança dos taludes situam-se entre 1,3 e 2,6. Já quando saturadas ocorre a flutuação do bloco na maioria dos taludes e consequente escorregamento do mesmo.

No quadro 1 é apresentado o resumo da análise da estabilidade dos taludes com a indicação das famílias suscetíveis a escorregamentos planares e em cunha, e os Fatores de Segurança para cada talude, nas condições seca (FS 1), com água (FS 2) no caso de escorregamento planar, e saturada (FS 2) para escorregamento em cunha.

Quadro 1 – Fatores de Segurança dos Taludes Suscetíveis a Escorregamentos Planares e em Cunha.

Talude	Direção/ Inclinação Talude	Escorregamento Planar				Escorregamento em Cunha			
		Família	Plano	FS 1	FS 2	Família	Planos	FS 1	FS 2
1	N10W/80SW	1	N19E/73NW	1,57	1,34	Sn X 2	N77E/71NW X N30E/59NW	2,59	1,23
2	EW/80N	Sn	N77E/75NW	1,31	1,00	Sn X 1	N77E/75NW X N20E/80NW	2,48	bloco flutua
3	EW/80S	3	N71E/72SE	1,07	0,87	-	-	-	-
4	N10W/80SW	1 e 5	N10E/75NW e N30W/75SW	1,44	1,13	1 X 5 e 2 X 5	N10E/75NW, N40E/63NW X N30W/75SW	1,91 e 1,35	bloco flutua
5	N8W/85SW	1 e 5	N24E/76NW e N15W/75SW	1,36 e 1,26	1,18 e 1,10	Sn X 5 e 1 X 5	N84E/70NW, N24E/76NW X N15W/75SW	2,0 e 1,82	bloco flutua
6	N10E/80SE	-	-	-	-	3 X 6	N80E/50SE X N40W/60NE	1,76	1,74

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A influência das estruturas dos maciços rochosos no processo de escorregamento advém dos planos das fraturas de orientação N15E/78NW e N30W/80SW (Famílias 1 e 5) que afloram na face livre da vertente para grande parte dos taludes da rodovia, pois são planos mais propícios devido a geologia local e ao corte dos taludes favorecerem os escorregamentos tanto planares como em cunha. Os planos da foliação possibilitam o desenvolvimento principalmente de cunhas, quando intersectam esses planos principais de fraturas.

As condições de estabilidade dos taludes rochosos da rodovia foram determinadas a partir da análise geométrica do maciço, que resultou na determinação das estruturas que regem o comportamento do talude, auxiliando na avaliação do fator de segurança.

Os taludes sujeitos a escorregamentos planares apresentaram alta suscetibilidade mesmo quando não estão saturados por água. Já para os taludes propensos a escorregamentos em cunha, a

suscetibilidade quando secos é baixa, porém há risco de flutuação do bloco quando estão na presença de água, podendo causar a movimentação do bloco da cunha.

Os maciços de gnaisses devido a sua compartimentação estrutural, apresentam-se foliados e com fraturas pervasivas ao longo de todos os afloramentos, sendo mais propensos a escorregamentos planares, mesmo não estando relacionados ao bandamento do gnaisse.

O uso de um modelo de análise da compartimentação estrutural dos maciços, aplicado no trecho aflorante da Serra do Azeite ao longo da rodovia BR-116, auxiliou na compreensão das estruturas que influenciam no processo de escorregamento, sendo uma ferramenta de auxílio para o gerenciamento de riscos dos taludes rodoviários e tomada de decisões.

Há várias técnicas de estabilização que podem ser empregadas para aumentar o fator de segurança desses taludes, dentre as quais, as medidas de contenção comumente utilizadas são: a aplicação de concreto projetado com tela de aço soldada ao longo de toda a encosta, a instalação de chumbadores para fixação de blocos e lascas, a drenagem superficial do maciço por meio de canaletas ou dissipadores de energia, e a drenagem interna do maciço feita por drenos horizontais profundos.

O uso de técnicas para controlar e minimizar as consequências de eventos de instabilização pode também ser implementado nesses taludes, como por exemplo, a instalação de telas metálicas fixadas por ancoragens ou a aplicação de barreiras para controlar a queda de blocos e lascas.

7 – AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a concessionária Arteris, que administra o trecho da rodovia que foi estudado, pelo patrocínio e apoio de campo, e também aos departamentos de pós-graduação da geologia e da engenharia civil da Universidade Federal do Paraná.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fiori, A. P.; Carmignani, L. (2015). *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes*. 3ª. ed. Editora Oficina de Textos, São Paulo, 576 p.
- Fiori, A. P. (2016). *Estabilidade de Taludes: Exercícios Práticos*. Oficina de Textos, São Paulo, 176 p.
- Gerscovich, D. (2012). *Estabilidade de Taludes*. Editora Oficina de Textos, São Paulo, 120 p.
- Kroeger, E.B. (1999). *Slope Stability Software*, 1: 1-3. Disponível em <http://www.engr.siu.edu/mining/kroeger>.
- Guidicini, G.; Nieble, C. M. (1984). *Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação*. Editorial Edgard Blucher. 2ª edição, São Paulo, 195 p.
- Parizzi, M. G.; Sobreira, F. G.; Galvão, T. C. B.; Elmiro, M. A. T.; Beirigo, E. A. (2009). *Mecanismos de ruptura de taludes rochosos de Belo Horizonte, MG*. Anais da 5ª Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas – COBRAE, 9p.