

**ESTUDO SOBRE A RUPTURA OCORRIDA NO TALUDE EM ROCHA DO  
KM 13,3 DA ES-177 (SERRA DA ALIANÇA, ES)**

Marcos Eduardo Hartwig<sup>1</sup>; Vinicius Scherrer Pinheiro<sup>2</sup>

**Resumo**

O presente trabalho teve como objetivo principal investigar as causas da ruptura ocorrida no corte de estrada do km 13,3 da ES-177, que interrompeu o tráfego entre os municípios de Jerônimo Monteiro e Muqui, Estado do Espírito Santo. O objetivo secundário foi o de determinar o volume de escombros associados a ruptura. Para tanto, combinou-se técnicas clássicas de mapeamento geológico-estrutural de taludes com sobrevoos de VANT - Veículo Aéreo Não-Tripulado. Os resultados mostraram que se trata de uma ruptura por tombamento direto. Os dados de VANT permitiram estimar que o volume de escombros decorrentes da ruptura é de cerca de 73 m<sup>3</sup>, distribuídos em uma área de aproximadamente 283 m<sup>2</sup>. Os dados compilados revelaram que a precipitação parece ter sido o principal fator desencadeador da ruptura.

**Abstract**

The main purpose of this study was to investigate the causes of a rock slope failure occurred at km 13.3 of the ES-177 roadway, which interrupted vehicle traffic between the municipalities of Jerônimo Monteiro and Muqui, State of Espírito Santo. The secondary aim was to estimate the volume of debris associated with failure. For this purpose, we combined classical techniques of geological and structural surveying with UAV - Unmanned Aerial Vehicle overflights. The results revealed a direct toppling failure mode. UAV data allowed us to estimate a volume of rock debris about 73 m<sup>3</sup> spread over an area of approximately 283 m<sup>2</sup>. Data revealed that rainfall seems to have been the main triggering factor for the slope failure.

**Palavras-chave:** VANT, análise cinemática, ruptura planar, maciço rochoso, Complexo Paraíba do Sul.

---

<sup>1</sup> Geól., Dr., Universidade Federal do Espírito Santo, cel. 11 9 9515 1814, e-mail: marcos.hartwig@ufes.br.

<sup>2</sup> Estudante do curso de geologia da Universidade Federal do Espírito Santo, e-mail: viniciussherrer@hotmail.com.

## 1. INTRODUÇÃO

Taludes naturais ou de escavação estão naturalmente sujeitos a escorregamentos e podem causar grandes prejuízos sócio-econômicos, inclusive levar a perdas de vidas humanas. Os escorregamentos podem ser desencadeados por diversos fatores, como regime pluviométrico, orientação desfavorável de descontinuidades, vibrações (naturais ou induzidas), ações antrópicas, inclinação do talude, etc. (Augusto Filho e Virgili, 1998).

Taludes em maciços rochosos estruturalmente controlados estão sujeitos a três tipos básicos de ruptura: planar, cunha ou tombamento (Wyllie e Mah, 2004; Hudson e Harrison, 1997). Cada um destes modos de ruptura dependerá da combinação entre a atitude das estruturas geológicas presentes, a geometria do corte e o ângulo de atrito dos planos de descontinuidade. Para se avaliar se um corte em rocha está sujeito ou não a algum destes modos de ruptura, são usualmente empregados estereogramas (Fiori et al. 1998). Os estereogramas irão conter os dados estruturais levantados em campo, a geometria do corte e o ângulo de atrito das descontinuidades. O tipo de ruptura é identificado então com base em critérios específicos. Fatores como presença de água e altura do corte não são levados em consideração nesta análise.

Nos últimos anos, a técnica de aerofotogrametria *Structure-from-Motion* (SfM) (Carrivick et al. 2016), vem sendo amplamente utilizada para estudos relacionados à estabilidade de taludes (Antoine et al. 2020; Giordan et al. 2020). Ela consiste da combinação de um conjunto de imagens digitais de Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANTs) ou drones, obtidas para um mesmo alvo a partir de pontos ligeiramente distintos, o que permite reconstituir a geometria e a posição espacial deste alvo. Esta ferramenta permite cobrir grandes áreas e acessar locais que dificilmente seriam mapeadas por meio de métodos tradicionais de levantamento de campo. Além disso, pode ser utilizada para determinar o volume e a área de feições na superfície, como erosões, escorregamentos, etc. (Hartwig e Ribeiro, 2021).

A área de estudo está localizada no km 13,3 da rodovia ES-177 (Figura 1). Esta rodovia de pista simples e de orientação geral NNW, é o principal acesso que liga os municípios de Jerônimo Monteiro e Muqui, porção sul do estado do Espírito Santo. Segundo jornais locais, em 08 de dezembro de 2019, houve uma grande ruptura em seu trecho de serra, interrompendo o trânsito de veículos. Um desvio temporário foi construído no local, sendo utilizado como acesso até os dias atuais. Do exposto, o objetivo principal do presente estudo foi o de investigar as causas da ruptura ocorrida e o objetivo secundário foi o de determinar o volume de escombros.



Figura 1 – À direita, localização da ruptura (imagem do GoogleEarth) ocorrida no km 13,3 da rodovia vicinal ES-177 (visada para Muqui). À esquerda, situação de campo em março de 2021.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo se localiza em uma porção do flanco norte da Serra da Aliança. Esta feição, de orientação NNE a NE, possui elevações que atingem 880 m.s.n.m, sendo sustentada, principalmente, por anfibólio biotita paragnaisses neoproterozóicos incluídos no Complexo Paraíba do Sul (Vieira, 1997). Esta unidade ocupa grande parte da porção centro-sul da Faixa de Dobramentos Araçuaí (Hasui, 2012), que possui estruturação N-S. Nos últimos anos, ela vem sendo redefinida (Vieira et al. 2015).

O corte estudado possui aproximadamente 20 m de altura e 30 m de extensão, orientação N140 e inclinação média da ordem de 80 graus. Sua porção superior encontra-se parcialmente recoberta por solo.

O gráfico da Figura 2 retrata a precipitação mensal para o ano de 2019 para a estação pluviométrica Fazenda Monte Alegre, que dista a aproximadamente 6 km a SSW da área de estudo. Conforme pode-se observar, os meses de novembro e dezembro foram, disparadamente, os mais chuvosos na região.

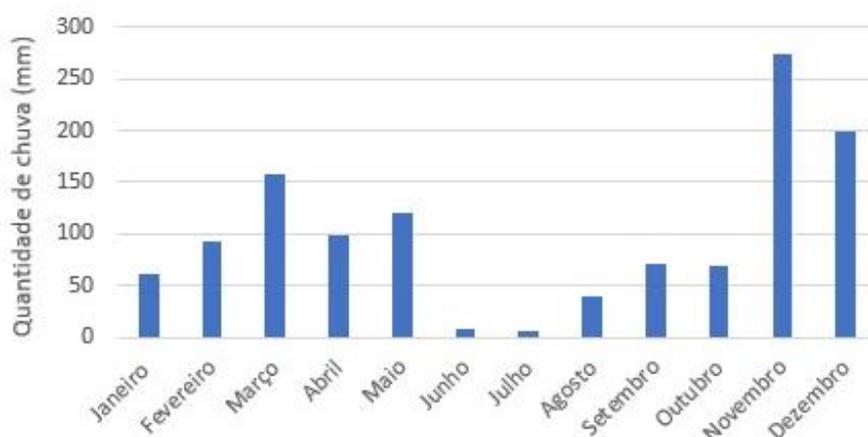


Figura 2 – Pluviometria mensal acumulada para o ano de 2019 para a estação pluviométrica Fazenda Monte Alegre. Fonte: ANA – Agência Nacional das Águas.

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada neste estudo compreendeu duas etapas: (1) descrição geológica das unidades aflorantes e cadastramento das estruturas geológicas; e (2) sobrevoo de VANT para a aquisição de imagens aéreas.

Na etapa 1, os dados geológicos e estruturais foram obtidos e descritos conforme ISRM (1981). Procurou-se cadastrar todas as feições estruturais possíveis no local da ruptura. Adotou-se a nomenclatura *dip direction/dip* para os dados estruturais. Estes, foram processados e analisados por meio de estereogramas Schmidt-Lambert no programa computacional DIPS (Rocscience). Para a avaliação dos modos de ruptura, utilizou-se os critérios descritos por Hudson e Harrison (1997) e Hoek e Bray (1981). Como no local afloram gnaisses e as poucas discontinuidades presentes não mergulham para dentro do maciço, não foram produzidos ábacos para a avaliação de ruptura por tombamento. Para a estimativa do ângulo de atrito ( $\phi$ ) dos planos de descontinuidade que condicionaram a ruptura (planos de foliação), utilizou-se o trabalho de Barton e Bandis (1990). Para tanto, estimou-se a rugosidade ( $J_r$ ), por meio de perfilômetro, e o grau de alteração das paredes destes planos ( $J_a$ ). Segundo os autores, superfícies lisas e onduladas ( $J_r = 2,0$ ) com paredes

apresentando película de material siltoso/argiloso ( $J_a = 3,0$ ), resultam em planos com ângulo de atrito ( $\phi$ ) da ordem de 34 graus.

A etapa 2 consistiu do levantamento aéreo por VANT. Para tanto, utilizou-se o equipamento quadricóptero Phantom 4 – Standard (DJI) e o aplicativo DJI GO 4 para o planejamento e execução de voo manual. As 12 imagens aéreas verticais obtidas a 15-03-2021 foram processadas no programa WebODM para a geração do ortofotomosaico e do modelo digital de superfície. O cálculo da área e do volume dos escombros foi estimado no software WebODM, por meio da digitalização de seu perímetro. As imagens aéreas de VANT também foram utilizadas para a identificação de estruturas geológicas (O’Leary et al. 1976 e Soares e Fiori, 1976). Não foi utilizado pontos de controle de campo – GCPs para o georreferenciamento dos produtos derivados de imagens de VANT.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Aspectos litoestruturais

Na área de estudo, afloram paragneisses esbranquiçados a acinzentados, levemente alterados e duros ( $R_4 - 50-100$  MPa). O bandamento é marcado por intercalações de níveis esbranquiçados de material quartzo-feldspático de granulação fina a grossa e níveis mais escuros constituídos de biotita orientada e minerais opacos de granulação fina. A espessura das bandas é da ordem de poucos centímetros. Algumas bandas escuras, quimicamente decompostas, aparecem na face remanescente do talude, e exibem sinais de percolação de água. Alguns destes planos parecem ter sido reativados como juntas de alívio, devido ao desconfinamento do maciço. Fitas de quartzo estirado (*ribbons*) de alguns centímetros de extensão ( $< 5$  cm) são visíveis em amostras de mão, indicando processo de milonitização. Veios de composição granítica de granulação muito grossa ocorrem localizadamente.



Figura 3 – Aspecto dos paragneisses cisalhados, dobrados e moderadamente alterados encontrados na área de estudo. Notar na porção superior do bloco, planos de foliação abertos. Na porção inferior da foto, observa-se um fragmento deslocado, cuja superfície exposta da foliação mostra-se ondulada e lisa e moderadamente alterada.

A foliação gnáissica mostra-se ondulada, sendo a principal feição estrutural do corte (Figura 4). A foliação apresenta orientação NNW a NW com caimentos moderados para NE. Em um afloramento próximo ao local da ruptura, observou-se planos de foliação empinados de orientação ENE com caimentos para NNW. Isso sugere a presença de dobras locais ou de falhas dúcteis.

O maciço mostrou-se pouco fraturado, sendo interceptado apenas por duas famílias principais de descontinuidades, com orientação NNE (F1) e EW (F2). Estas estruturas possuem alto ângulo

de mergulho e mostram caimentos ora para um ora para outro quadrante. Possuem persistência de vários metros e podem ser identificadas facilmente a partir das imagens de drone (Figuras 5 e 6). Conforme estas figuras, observa-se que a interseção das famílias de fraturas com a face do talude desenha em planta um triângulo, que delimita a área de distribuição dos escombros.

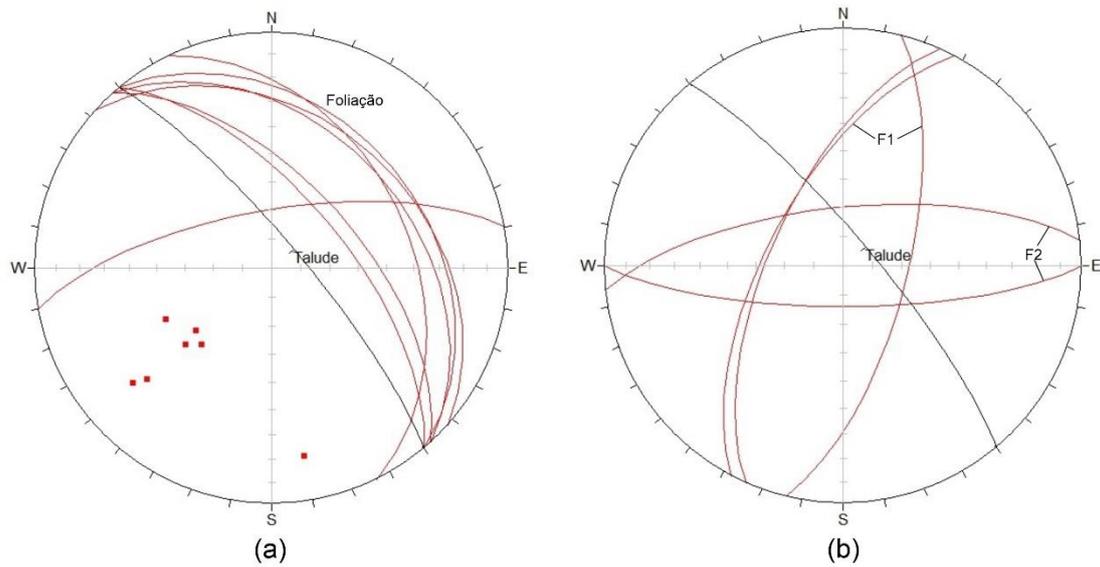


Figura 4 – Estereogramas Schmidt-Lambert (hemisfério inferior | igual área): (a) planos e pólos da foliação e (b) planos de fraturas. O talude está indicado pela linha preta.

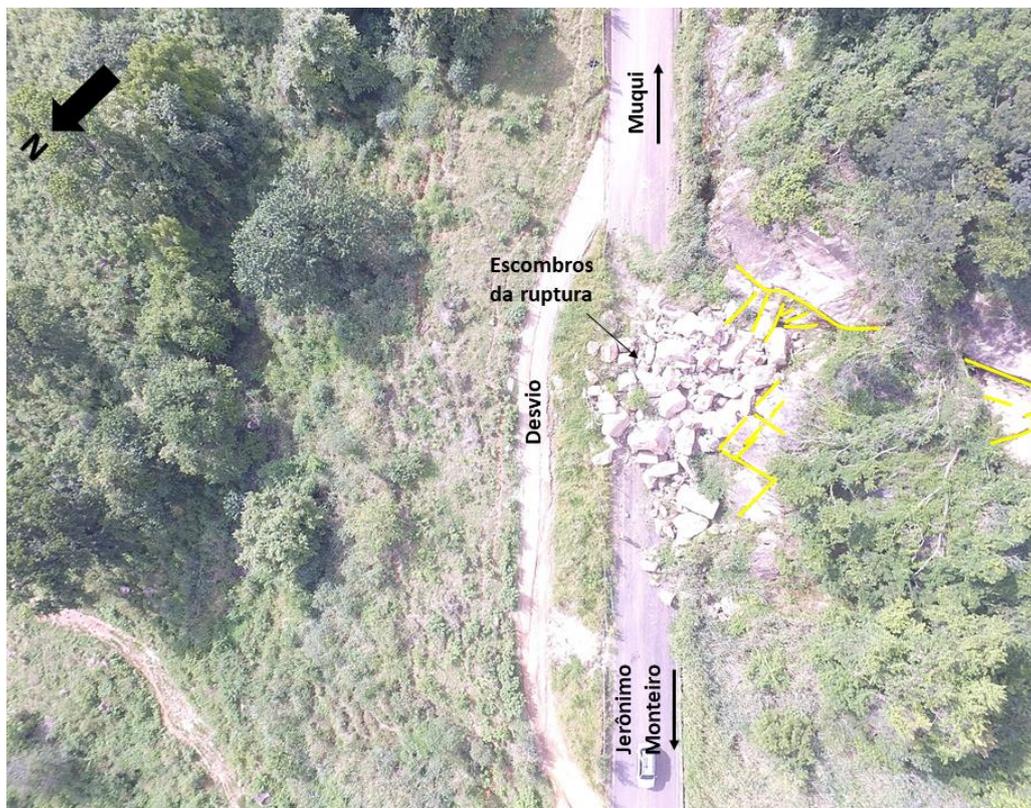


Figura 5 – Interpretação estrutural de foto aérea vertical obtida por VANT. Linhas em amarelo correspondem aos traços das discontinuidades principais. Maciço rochoso constituído por gnaisse. A hipsometria aumenta para sudoeste.



Figura 6 – Vista aérea oblíqua do corte obtida por VANT. Notar os planos de descontinuidades controladores da ruptura e a presença de umidade nos planos de foliação. Observar a grande persistência destas estruturas (vários metros).

#### 4.2 Análise cinemática de estabilidade de taludes

Considerando apenas a Figura 7, os três modos de ruptura são possíveis para o talude estudado. Contudo, conforme visto em campo (Figura 6) existe uma interseção de planos de fratura que mergulha para dentro do maciço com alto mergulho, limitados na base por uma família de estruturas (foliação) que mergulha para fora do talude, e com ângulo de mergulho maior que o ângulo de atrito. Essas características definem o modo de ruptura por tombamento direto, no qual ocorre tombamento de blocos associado a cisalhamento de planos basais (Figura 7c).

Apesar das numerosas interseções de planos estruturais na meia lua que define rupturas em cunha (Figura 7b), não foi observado este modo de ruptura no local.

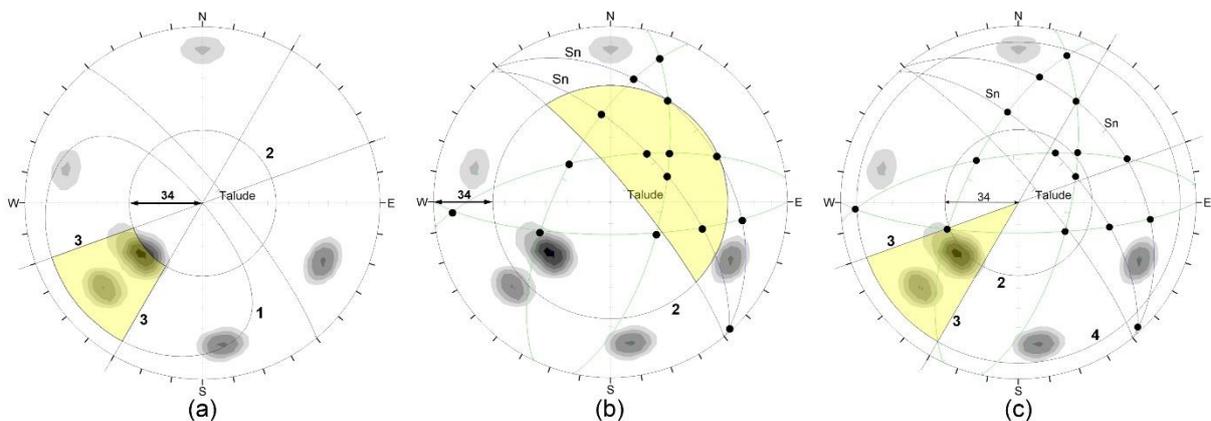


Figura 7 – Análise estereográfica para ruptura planar (a), ruptura em cunha (b) e tombamento direto (c). Legenda: 1 – envelope dos planos que afloram na face e possuem mergulho inferior ao do talude e 2 – cone de atrito, 3 – restrições laterais (20°), 4 – 90° - ângulo de mergulho do talude (10°) e Sn – foliação. O talude

possui atitude média de 050/80 (*dip direction/dip*). A região crítica corresponde as áreas hachuradas em amarelo.

### 4.3 Estimativa de volume e área dos escombros

Conforme a Figura 8, o volume de escombros estimado foi de 72,74 m<sup>3</sup> e a área ocupada por estes foi de aproximadamente 283 m<sup>2</sup>. Conforme a figura, os blocos exibem tamanhos muito variados.

Com base nas figuras 5 e 6 e em observações de campo, verifica-se que a interseção das duas famílias de fraturas com a face do talude gera aproximadamente um triângulo retângulo com área da ordem de 21 m<sup>2</sup> (Figura 9). Assumindo-se que a espessura média entre a superfície original do terreno e o plano de ruptura (foliação) seja da ordem de 5 m, isso resultaria em um prisma de rocha com volume de aproximadamente 105 m<sup>3</sup>.

A diferença nos valores (~32 m<sup>3</sup>) pode ser devida a geometria da superfície que passa na base dos escombros e que foi considerada pelo algoritmo para o cálculo do volume.

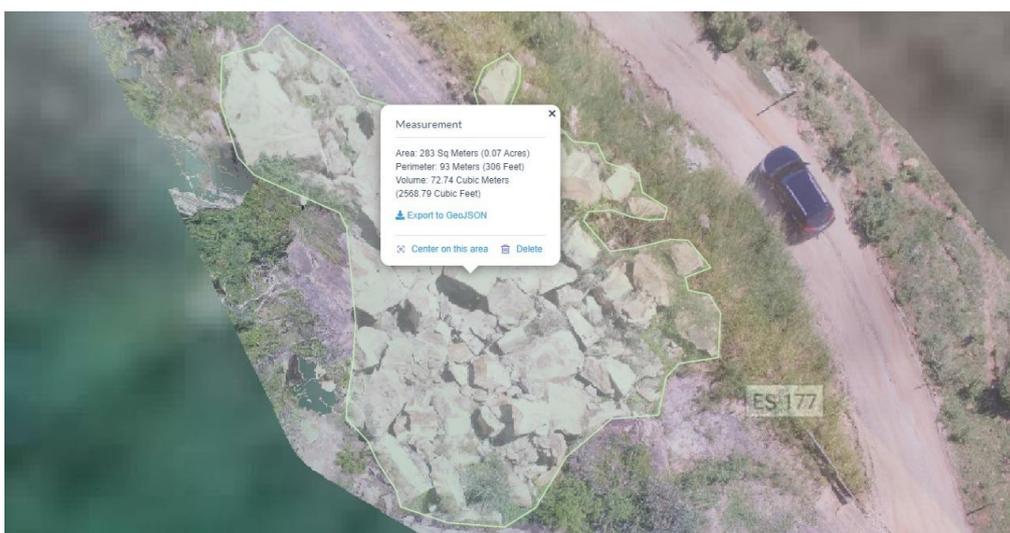


Figura 8 – Volume e área de escombros estimados a partir do ortofotomosaico e do modelo digital de superfície. Ao fundo, imagem do GoogleEarth de mais baixa resolução espacial.

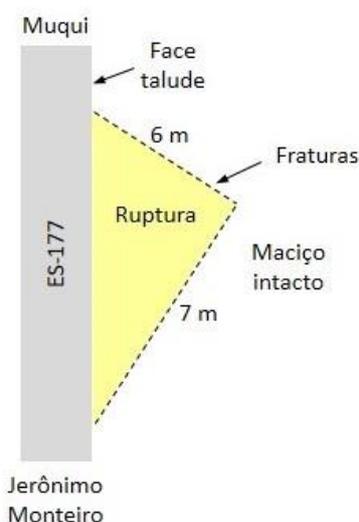


Figura 9 – Figura geométrica considerada para a estimativa do volume de escombros com base em observações de campo. Vista em planta.

#### 4.4 Hipóteses sobre as causas da ruptura

Diversos são os fatores com potencial de induzir rupturas em taludes (Augusto Filho e Virgili, 1998). No contexto da área de estudo, destacam-se: a) vibrações (ou acelerações); e b) precipitação.

Quanto a primeira causa, pode-se afirmar que seu efeito é desprezível. Em primeiro lugar, porque em um raio de dois (2) quilômetros do local da ruptura, não existe nenhuma pedreira ou obra de engenharia), que faça uso de explosivos para o desmonte do maciço. Em segundo lugar, porque o tráfego de veículos entre os municípios de Jerônimo Monteiro e Muqui é baixo, sendo constituído essencialmente por veículos de médio e pequeno porte, que trafegam a baixa velocidade no local.

Com relação à precipitação, constatou-se que nas semanas que antecederam a ruptura foram registradas precipitações significativas (os meses de novembro e dezembro registraram as maiores precipitações acumuladas no ano de 2019, atingindo valores de cerca de 475 mm (Figura 2), o que nos permite concluir, que esta deve ter sido a principal causa da ruptura ocorrida no talude do km 13,3 da ES-177.

#### 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo do presente estudo foi o de analisar a ruptura ocorrida no corte de estrada do km 13,3 da ES-177 (Serra da Aliança). Os resultados permitem afirmar que:

- O modo de ruptura do maciço é o tombamento direto, sendo condicionado pelos planos de foliação e duas famílias de fratura de alto ângulo de mergulho.
- Os dados de VANT permitiram estimar que o volume de escombros é de cerca de 73 m<sup>3</sup> distribuídos em uma área de 283 m<sup>2</sup>. Estes dados podem auxiliar os gestores públicos (DER-ES) na estimativa de custos para a remoção de escombros e dimensionamento de equipamentos.
- Os dados de precipitação analisados revelam que as semanas que antecederam a ruptura registraram chuvas intensas, o que sugere que este tenha sido o principal fator desencadeador da ruptura;

#### REFERÊNCIAS

- ANTOINE, R., LOPEZ, T., TANGUY, M. et al. (2020). *Geoscientists in the Sky: Unmanned Aerial Vehicles Responding to Geohazards*. *Surv. Geophys.* v. 41, p. 1285–1321. <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09611-7>
- AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J.C. (1998). *Estabilidade de taludes*. In: Oliveira e Brito. *Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE. p.243-269.
- BARTON, N. R.; BANDIS, S. C. (1990). Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. In: *Rock Joints, Proc int symp on rock joints*, Loen, Norway (eds N. Barton and O. Stephenson). p. 603-610.
- CARRIVICK, J.L., SMITH, M.W., QUINCEY, D.J. *Structure from motion in the Geoscience*. Chichester, UK: Wiley-Blackwell. 2016. 208p.
- FIORI, A.P. et al. (1998). *Estudo da estabilidade de taludes escavados da Mina Saivá, PR*. *Solos e Rochas*. V.21, n.1, p. 19-29.
- GIORDAN, D., ADAMS, M.S., AICARDI, I. et al. (2020). *The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for engineering geology applications*. *Bull. Eng. Geol. Environ.* v. 79, p.3437–3481. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01766-2>
- GOODMAN, R. E. *Introduction to rock mechanics*. New York: John Wiley & Sons. 1980. 478p.

- HASUI, Y. Sistema Orogênico Mantiqueira. In: HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R.; ALMEIDA, F. F. M.; BARTORELLI, A. *Geologia do Brasil*. São Paulo: Becca. 2012. p. 331-374.
- HARTWIG, M.E.; RIBEIRO, L.P. (2021). *Gully evolution assessment from Structure-from-Motion, southeastern Brazil*. *Environmental Earth Sciences*. v.80, 548. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09831-z>
- HOEK, E.; BRAY, J.W. *Rock slope engineering*. London, UK.: E& FN SPON. 3d Edition. 1981. 358p.
- HUDSON, J. A.; HARRISON J. P. *Engineering Rock Mechanics: an introduction to the principles*. United Kingdom: Elsevier Science Ltd. 1997. p. 310-323.
- ISRM – International Society of Rock Mechanics. (1981). *Basic geological description of rock masses*. *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci*, v. 18, n. 1, p. 87-110.
- 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*, v.87, p. 1463 – 1469.
- SOARES, P. C.; FIORI, A. P. Lógica e Sistemática na Análise e Interpretação de Fotografias Aéreas em Geologia. *Notícia Geomorfológica, Campinas*, v. 16, n. 32, p.71-104, dez. 1976.
- VIEIRA, V. S.; SILVA, M. A.; CORREA, T. R.; LOPES, N. H. B. *Geologia e recursos minerais do Estado do Espírito Santo: mapas geológicos estaduais*. Escala 1:400.000. Belo Horizonte: CPRM. 2015. 289p.
- VIEIRA, V.S. (1997). Cachoeiro de Itapemirim (Folha SF.24.Z-V-A). *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - Escala 1:250.000*. Brasília: CPRM. 110p.
- WYLLIE, D.C.; MAH, C.W. *Rock slope engineering: civil and mining*. London: Spon Press. 2004. 431p.