



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Deslizamento em Uma Vertente do Rio Madeira em Porto Velho – RO: Uma Análise Morfomecânica

Salem Leandro Moura dos Santos¹, Eliomar Pereira da Silva Filho², Isabel Leonor Iza Echeverria Herrera³

^{1,3}. Doutorandos em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia – PPGG do Departamento de Geografia – DGEO da Universidade Federal de Rondônia – UNIR, salemsantos@gmail.com.br e isaiza@gmail.com. ². Prof. Dr. Titular do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Rondônia – UNIR, Campus, Porto Velho, eliomarfilho@uol.com.br.

Artigo recebido em 19/03/2019 e aceite em 11/11/2019

RESUMO

Este estudo tem o objetivo de estabelecer o nível piezométrico que a vertente tinha antes do deslizamento, a morfometria e a causa do movimento de massa. Para isto, foi utilizada equação de Equilíbrio-Limite, com o Fator de segurança em 1,49 para estabelecer o nível piezométrico necessário para causar o colapso da encosta, como também, a determinação de propriedades geomecânicas, como coesão, densidade, ângulo de atrito, tensão de cisalhamento, limites de Atterberg, além da granulometria e da morfometria. A vertente apresentava o formato convexo no topo e côncavo na base, ambos seccionados no meio pelos formatos retilíneo e côncavo. A inclinação média era de 35,17° em uma dimensão de 46,01m. A Equação indicou um nível piezométrico mínimo de 18,53 metros de altura para o colapso. Um aspecto que influenciou o deslizamento foi à erosão superficial causada por uma galeria de água pluvial, que uma vez rompida, erodiu o pacote de material superficial, Argilo Siltoso Mosqueado, que serve de proteção para a vertente, pois possui maior coesão e plasticidade. Após a completa erosão do pacote superior, houve a exposição pontual do pacote inferior, que após sofrer forte precipitação pluvial de 32,20 mm, ocorrida no dia 30/09/2013, ocasionou a elevação do nível piezométrico deste material inferior, Silto Arenoso Tangencial, de menor coesão e plasticidade que saturou, comportando-se de maneira semi-líquida. Devido este material ser todo o alicerce da encosta, o seu colapso causou todo o deslizamento rotacional da vertente. Verifica-se a importância de manter o material superior desta margem do Rio.

Palavras-Chave: Nível Piezométrico, Morfometria, Ruptura Circular.

Landslide in The Madeira River Slope in Porto Velho - RO: A Morfomechanical analysis

ABSTRACT

The aims this paper is establish the piezometric level that the slope had before sliding, morphometry and the cause of mass movement. For this, the Equilibrium-Limit equation was used, with the Safety Factor at 1.49 to establish the piezometric level necessary for collapse of the slope, as well as the determination of geomechanical properties, such as cohesion, density, friction angle, shear stress, Atterberg boundaries, granulometry and morphometry. The strand had the convex shape at the top and concave at the base, both sectioned in the middle by the rectilinear and concave shapes. The average slope was 35.17° in a dimension of 46.01m. Equation indicated a minimum piezometric level of 18.53 meters high for collapse. One aspect that influenced the sliding was the superficial erosion caused by a gallery of rainwater, which once ruptured, eroded the package of surface material, Silt Clay Mottled, which serves as protection for the slope, as it has greater cohesion and plasticity. After complete erosion of the upper package, there was a punctual exposition of the lower package, which after suffering heavy rainfall of 32.20 mm, occurred on 09/30/2013, caused the elevation of the piezometric level of this lower material, Sand Silt Tangential, of lower cohesion and plasticity that saturated, behaving in a semi-liquid way. Because this material is the whole foundation of the slope, its collapse caused all the rotational slip of the slope. It's important to maintain the superior material of the slope, aiming at the reduction of shear forces and erosions.

Keywords: Piezometric Level, morphometry, Break Circle.

Introdução

Os primeiros estudos sobre movimentos de massa, segundo DeLuca e Versace (2016), Reichenback et al. (2018) e Li e Mo (2019) são atribuídos à Sharp (1938), que é citado como o primeiro autor a abordar de forma rica e clara os deslizamentos de terra (*Landslide*), contudo muito antes de Sharp, Danna (1864), em seu trabalho *Manual of Geology*, organizou os deslizamentos de superfície em três tipos: Fluxo de Detritos; Corridas de Terra e Deslizamentos de Rocha. Porém, esta classificação sugerida por Danna (1864), foi gradualmente abandonada até à segunda metade do século XX, quando Terzaghi e Peck (1948), introduziram-na nos estudos de mecânica dos solos.

Uma revisão mais ampla da classificação dos tipos de movimentos de massa foi realizada por Varnes (1978), que chama de movimentos de vertentes todas as ações erosivas ocorridas nas encostas. Segundo o Autor, o deslizamento é um tipo de movimento de massa que é dividido em duas formas: (a) em materiais movimentados com pouca deformação, constituídos de uma ou de poucas unidades de movimento; (b) materiais muito deformados, constituídos de várias unidades semi-independentes. Estas duas formas de deslizamentos distinguem os tipos de rupturas na vertente: translacionais e rotacionais, (a) e (b) respectivamente.

Outros autores propuseram classificações de movimentos de massa em vertentes por meio de atributos morfológicos e físicos dos materiais que compõe a encosta, como Hungr et al. (2001), Lima, Cordeiro e Bastos (2015), Riffel et al. (2016), Singh, Umrao e Singh (2017), Vaz, Fiori e Silveira (2018). Que colaboraram com a definição de conceituar os deslizamentos como fenômenos provocados pelos escorregamentos de materiais sólidos como solos, rochas e vegetações ao longo de terrenos inclinados.

Verifica-se, que há uma necessidade de se obter a composição dos materiais que constituem a vertente, para classificar os tipos de deslizamento que ocorrem no relevo, que por sua vez, necessitam da morfometria para classificar os tipos de modelados mais propícios aos movimentos de massa.

Desta forma, para analisar as causas dos deslizamentos em vertentes, é necessário avaliar as forças que aumentam a tensão cisalhante nos materiais que compõe a mesma, como sobrecargas, cortes, erosões ou a diminuição da resistência do solo como intemperismo, fissuras, aumento da tensão neutra causada pela expansão da frente de infiltração (Santos et al. 2018), (Hussain et al. 2019).

Como também, avaliar a declividade, pois as superfícies com inclinação próxima aos 30° são as mais propícias à erosões e a deslizamentos translacionais, pois apresentam energia potencial e materiais suficientes para deflagrar o processo, visto que, as encostas mais íngremes por mais que apresentem maior energia potencial, não possuem materiais suficientes para iniciar o processo de erosão e de deslizamentos translacionais, no entanto por terem maior nível de infiltração e percolação tendem a saturar o solo em maior área e profundidade, diminuindo sua coesão, pondo toda encosta no limite de sua resistência para desencadear o movimento rotacional de massa (Guerra e Marçal, 2006); (Gerscovich, 2016).

Destaca-se que a percolação é um dos componentes no processo de intemperização química, que segundo Guidicini e Nieble (1984), a intemperização em solos tem efeito oposto aos das rochas, pois a alteração do solo poderá resultar em um maior adensamento ou cimentação do solo por meio de minerais secundários, argilominerais silicatados ou de óxidos-hidróxidos de ferro e alumino, aumentando sua resistência. Porém isso não ocorre na rocha, onde a alteração diminui a resistência mecânica, aumenta a deformabilidade e a permeabilidade. Esse processo nas rochas tende a formar zonas de materiais com características diferenciadas de permeabilidade dispostas paralelamente à vertente, que diminuem a estabilidade da mesma, que são classificadas como solos residuais jovens para a Geotecnia e de horizonte C para a Pedologia (Polivanov e Barroso, 2011).

Quando há um deslizamento de vertente a melhor forma de avaliá-la é por meio de estudos de retroanálise, que é um método rápido, eficiente e de baixo custo, visto que, já se sabe o tamanho da área mobilizada; o embasamento da encosta, pois o mesmo está exposto; o tipo de ruptura e uma provável causa (Guidicini e Nieble, 1984). Por meio dos dados de altimetria dos flancos que resistiram ao movimento ou a dados cartográficos pré-existentes, como mapas topográficos é possível avaliar o tamanho do movimento.

Das causas destacadas por Santos et al. (2018) e Hussain et al. (2019), verifica-se na vertente analisada, que há um constante exfluxo d'água pelos flancos que influenciam na tensão neutra de toda massa terrosa, como também, no intemperismo químico, causado pela percolação.

Além do exfluxo d'água na vertente em análise, verificou-se que no topo da mesma, havia uma construção comercial de um andar, que utilizava o espelho da encosta para sustentar o

alicerce da construção, aumentando a tensão efetiva da vertente com sobrecargas.

Na base da vertente, havia um corte para o assentamento dos trilhos da ferrovia Madeira Mamoré, que apresentava feições erosivas em sua parte inferior e pequenos desmoronamentos na parte superior do corte. Percebe-se que ao analisar as causas que aumentaram a tensão cisalhante destacadas por Santos et al. (2018) e Hussain et al. (2019) esta vertente apresentava todos os requisitos para colapsar. Fato este ocorrido em 2013.

O objetivo deste estudo é de estabelecer o nível piezométrico preliminar que a vertente

apresentava antes do deslizamento, utilizando valores geomecânicos de solos coletados em campo, como também a morfometria da vertente antes do colapso e a causa do movimento.

Localização da área

A área de estudo localiza-se na margem direita do Rio Madeira, no perímetro urbano de Porto Velho – Rondônia, no bairro Centro da cidade (Figura 1).

O deslizamento ocorreu em uma vertente com vegetação remanescente que acima, desta área mobilizada, localizava-se um restaurante, Figura 2.

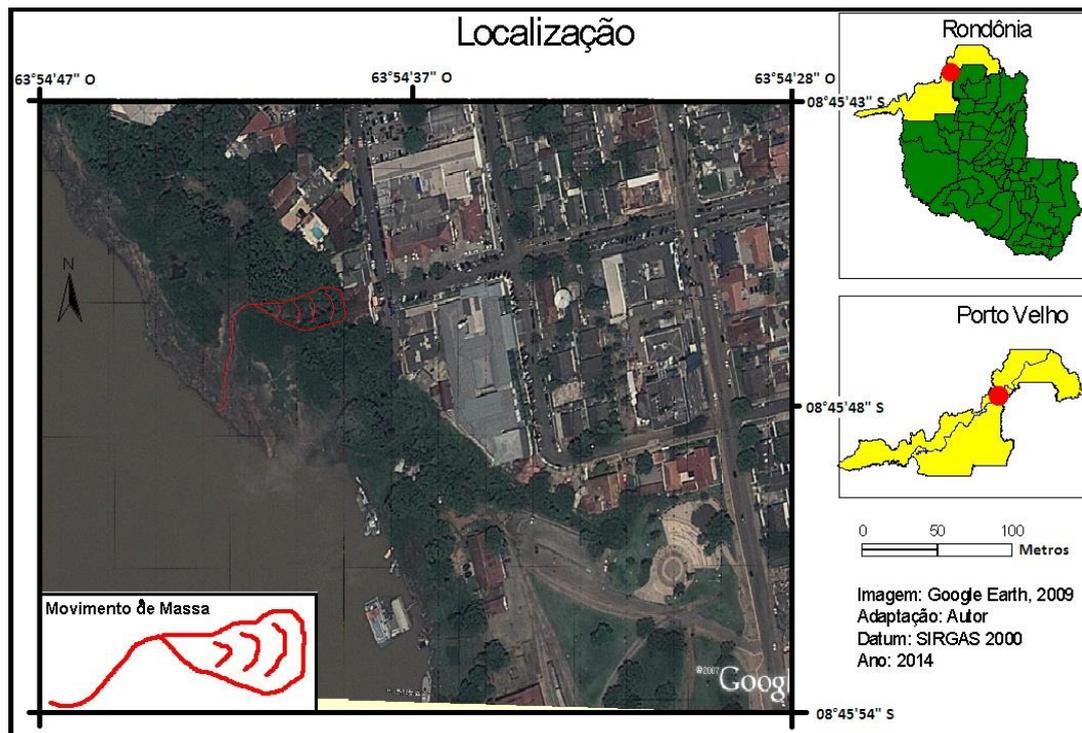


Figura 1 – Mapa de localização da área do movimento de massa.



Figura 2 – Deslizamento e galeria de descarregamento de água servida, (seta).

Geologia

A vertente localiza-se na área da Formação Rio Madeira, que segundo Rizzotto et al. (2005) é composta de depósitos de sedimentos do leito ativo do Rio e de sua planície de inundação, com formação de diques marginais. Esses depósitos são compostos por sedimentos inconsolidados e semiconsolidados como cascalhos e areias grossas mal selecionadas, estratificadas e ferruginizadas, além de argilas rígidas laminadas (Figura 3).

A Formação Rio Madeira é composta por 4 camadas distintas. A camada inferior é composta de argila plástica cinza clara fossilífera

que se assenta diretamente sobre o embasamento cristalino do Complexo Jamari. Acima desta formação encontra-se uma camada de cascalho de oxi-hidróxido de ferro de matriz arenosa, sobreposta a um horizonte de areia endurecida por oxi-hidróxido de ferro. A camada superior da formação consiste em areia ocre a castanha escura concentrada ao longo de superfícies estratificadas tangenciais (CPRM, 2007).

A Formação Rio Madeira está encoberta por um pacote de argila siltosa amarelada e mosqueada de estrutura maciça localizada em cordões sinuosos de limites íngremes e de diques marginais (Rizzotto et al. 2005), (Figura 3).

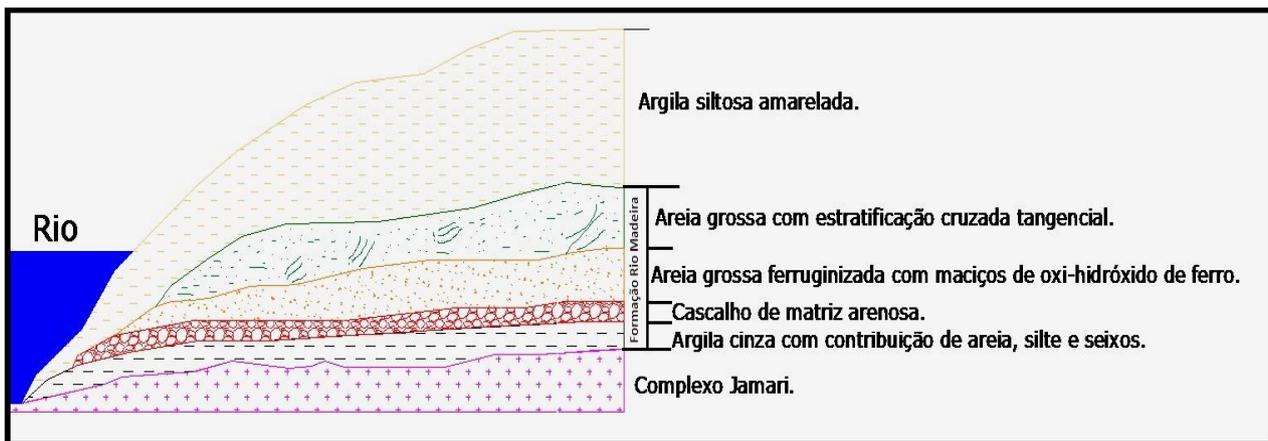


Figura 3 – Corte esquemático da Formação Rio Madeira.

A área do movimento está localizada em um alto estrutural e um baixo topográfico (A/b), devido ao megalineamento Madre Dios-Itacoatiara, que subordina o rio Madeira neste local (Silva, 2014). Nesta área, devido à movimentações verticais desta falha geológica no período do Mioceno desencadeou a subsidência do rio Madeira (Rizzotto et al. 2005), expondo as rochas do complexo Jamari aos processos de intemperização química, dada a sua proximidade com a superfície terrestre.

Segundo CPRM (2007), a margem direita do Rio Madeira, no perímetro urbano de Porto Velho, onde localiza-se o deslizamento, apresenta foliações miloníticas na Formação do complexo Jamari, devido a reativações de falhas na era Proterozóica, que gerou lineações de estriamento de cristais de quartzo e feldspato nas rochas no sentido NW-SE, com caimento verticalizado (hemigraben). Essas foliações de transposição de falhas de caráter regional foram classificadas como a fase de deformação Sn+1 Transamazônico

(Figura 4). A foliação milonítica está geneticamente relacionada as altas taxas de deformação e de cisalhamento dúcteis com recristalização mineral da rocha.

As formações miloníticas na área do deslizamento condizem com a falha em orientação N20W pertencente aos lineamentos transversais ao megalineamento Madre de Dios-Itacoatiara, de orientações entre N10E a N80E. Esses lineamentos transversais de falhas normais são de origem extencional intraplaca, datada entre o Proterozóico inferior e o Proterozóico Superior (Silva, 2014). Fato esse, identificável no saprolito da encosta que preserva a estrutura da rocha-matriz em formato tangencial ao lineamento principal de falhas, revelando um hemigraben de deslocamento vertical, ato que influencia diretamente na inclinação da vertente, que se apresenta proeminente em relação às encostas que estão fora do hemigraben, nas margens do Rio Madeira.

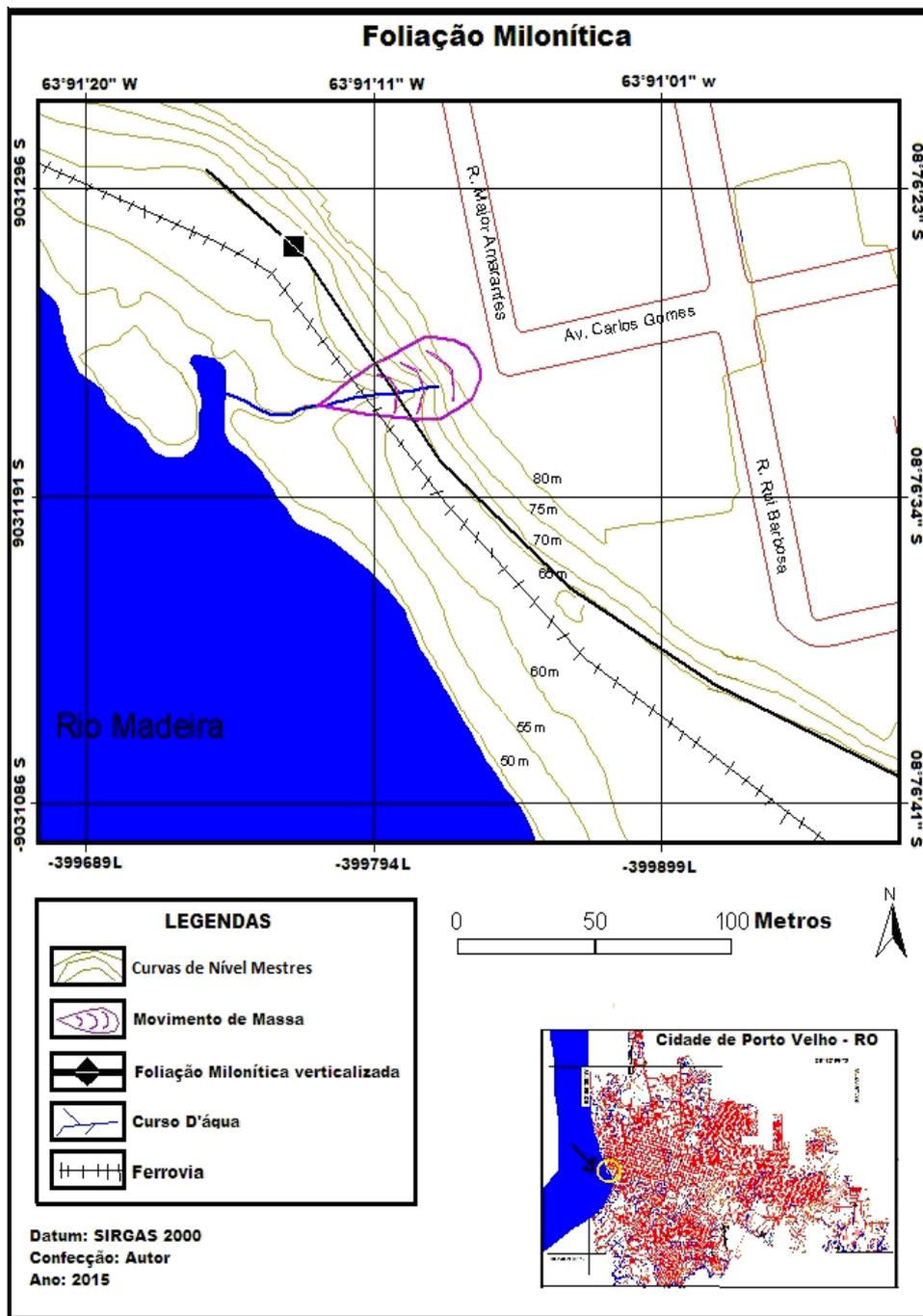


Figura 4 – Foliação milonítica na área do deslizamento.

Material e métodos

Para análise da encosta rompida foi utilizado método de cunho determinístico baseados no conceito de equilíbrio-limite. Devido ao formato da superfície do deslizamento ser circular, fato observado em campo foi utilizada a equação proposta em Fiori e Carmignani (2015) e aplicada por Folador, Silveira e Fiori (2018), para a obtenção do fator de segurança da vertente rompida e do nível piezométrico, método este, que utiliza como fator de segurança a Equação 1.

$$s = c + \gamma \cdot tg\phi \quad (1)$$

Onde:

S= coeficiente de cisalhamento

C =coesão do solo (kg/cm²)

γ = peso do solo (g/cm³)

tg ϕ = ângulo de atrito interno do solo (graus)

A encosta é considerada estável quando o fator de segurança mínimo for maior que o fator de segurança requerido, devendo ser maior que 1,5. Uma vertente é considerada em estado de iminência de ruptura quando seu fator de segurança mínimo for igual a 1,0 e uma vertente é

considerada instável quando seu fator de segurança mínimo for menor que 1,0 (Caputo, 2015).

A equação empírica proposta por Fiori e Carmignani (2015), é empregada para calcular o fator de segurança ou outras variáveis constantes na mesma. Neste estudo, a equação foi empregada

para calcular o nível piezométrico (h_w) da encosta, levando em conta o papel da vegetação e do vento como fatores que influenciam na estabilidade da vertente (Equação 2).

$$F_s = \frac{C_s + \left[\left(\gamma_{nat} - \frac{h_w}{h} \gamma_a \right) h \cdot \cos i + \sigma_a \cdot \cos i \right] \operatorname{tg} \phi}{(h \cdot \gamma_{nat} + \sigma_a) \operatorname{sen} i + \sigma_{ve}} \quad (2)$$

Tabela 1 – Fatores da equação.

F _s : Fator de Segurança
C _s : Contribuição do solo/ coesão (kg/cm ²)
γ_{nat} : Peso natural do Solo (g/cm ³)
h_w : Altura do nível freático (m)
h: Altura do Talude (m)
γ_a : Peso da água (g/cm ³)
Cos i°: co-seno do ângulo de inclinação
σ_a : Peso das árvores (KPa)
tg ϕ °: Tangente do ângulo de atrito interno
Sen i°: Seno do ângulo de inclinação
σ_{ve} : Pressão do vento sobre árvores (KPa)

Fonte: Fiori e Carmignani (2015).

Esta equação somente é válida para deslizamentos rotacionais profundos, no qual o plano de escorregamento se posiciona abaixo do alcance das raízes (Fiori e Carmignani, 2015). Conforme ocorrido com o deslizamento em análise.

Dever ser mencionado que o papel do vento (σ_{ve}) só terá significado para o aumento das forças favoráveis ao deslizamento quando este estiver em sentido da pendente e com uma velocidade a partir de 40 km/h (Tabalipa e Fiori, 2008).

A influência do peso da árvore sobre uma encosta (σ_a) é obtida multiplicando o peso da árvore pela área de suas raízes. Este peso varia de acordo com os diferentes tipos de vegetação.

Em estudos realizados nas vertentes do rio Marumbi, na Serra do Mar no Paraná, Kozciak (2005) calculou valores do peso das árvores nas ordens de 3,6 KPa para florestas e de 2,0 KPa para capoeiras, valores estes utilizados neste estudo, uma vez que, a vertente possuía vegetação de floresta antes do incidente, valores próximos também foram obtidos por Ataíde et al. (2015).

Nota-se que em vertentes constituídas basicamente de solos, com pouca ou nenhuma presença de rochas o fator de segurança deverá ser aumentado para F.S.= 1,5 devido aos diferentes tipos de solos encontrados ao longo da vertente. Deve-se verificar que há subclassificações no F.S. dependendo do tipo de solo (DNER, 1996), conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Valores do Fator de Segurança

Fator de Segurança	Classes	Diagnóstico
$0 < F_s < 1,0$	1	Instabilidade
$1 \leq F_s < 1,5$	2	
$1,5 \leq F_s < 2,0$	3	Estabilidade Crítica
$2,0 \leq F_s < 3,0$	4	Boa Estabilidade
$3,0 \leq F_s < 4,0$	5	Alta Estabilidade
$4,0 \leq F_s < 5,0$	6	Excelente Estabilidade
$5,0 \leq F_s < 8,0$	7	
$8,0 \leq F_s < 10,0$	8	
$F_s \geq 10,0$	9	

Fonte: DNER (1996).

Os dados de altura, comprimento, largura e cubagem da vertente foram obtidos por aferições em campo utilizando-se trena de 50 metros e as curvas de nível foram obtidas pela carta topográfica Porto Velho do ano 2000, em escala de 1:5.000 obtida por coletas de dados com estação total em campo, com cotas altimétrica de um em um metro e curvas mestres em 5 metros, elaborada pela Secretaria Municipal de Planejamento de Porto Velho – SEMPLA.

O índice pluviométrico diário foi obtido pelo Boletim Climatológico de Rondônia, que disponibiliza além dos valores pluviométricos, a velocidade e a direção do vento (SEDAM, 2016).

Os valores de limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), peso específico,

coesão, ângulo de atrito interno e granulometria do solo foram obtidos por amostras de campo coletadas em anéis de Kopect e em amostras indeformadas, que foram retiradas em perfis verticais do topo da vertente, a 0,1, 1, 10 e 20 metros de profundidade; do meio a 0,1, 1 e 10 metros de profundidade e do sopé da vertente, a 0,1 e 1 metro de profundidade, utilizou-se os flancos do deslizamento para este procedimento de coleta (Figura 5). As amostras foram seladas com película de PVC, para manter a umidade natural dos materiais e levadas para análise no laboratório de Pedologia e Geomorfologia da Universidade Federal de Rondônia - UNIR.

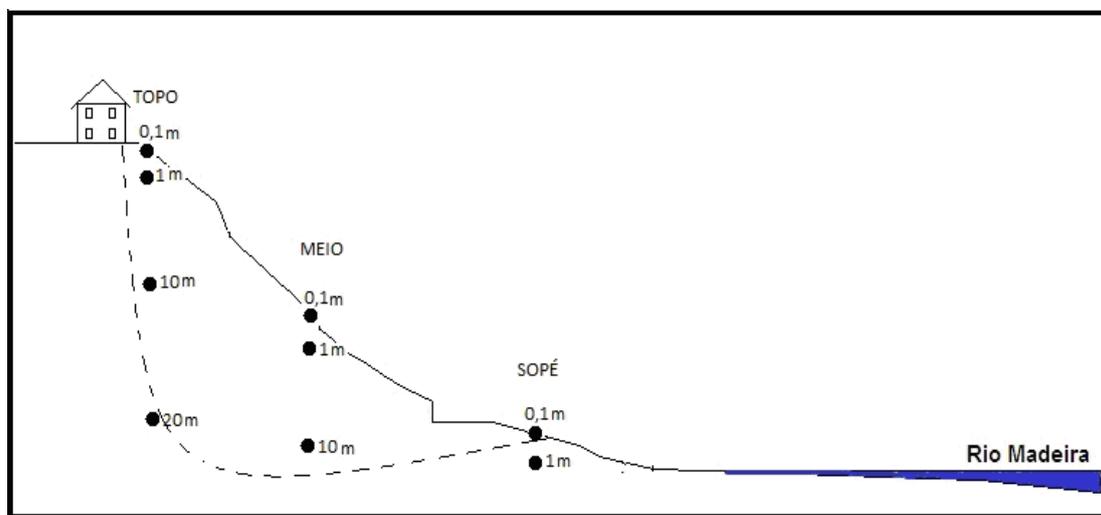


Figura 5– Perfis das coletas de amostras na vertente.

No laboratório, as amostras confinadas em anéis foram pesadas para estabelecer o peso

natural do material, em seguida foram secas junto com as amostras indeformadas ao ar por uma

semana e realizada a peneiragem para cálculo granulométrico, utilizando o método da EMBRAPA (2017).

Os limites de Liquidez e de Plasticidade foram realizado seguindo os padrões metodológicos da NBR 6459 (ABNT, 1984a) e NBR 7180 (ABNT, 1984b).

A coesão do solo foi obtida por meio do índice plasticidade (IP) aplicável no índice de consistência (IC) (Fiori e Carmignani, 2015), (Equação 3).

$$IC(\%) = \frac{LL - h}{IP} \quad (3)$$

h = umidade (%)

IP = LL-LP (%)

O ângulo de atrito interno foi obtido por meio da equação matemática proposta em Caputo (2015), (Equação 4).

$$tg\phi = 0,58 - 0,0045 \cdot IP \quad (4)$$

Além dos métodos propostos foi obtido o valor da atividade coloidal das argilas para auxiliar na classificação da influência destas na estabilidade da vertente.

O índice de atividade coloidal classifica as argilas em argilas inativas (1:1) e argilas ativas (2:1), que é de fundamental importância para a estabilidade das encostas, pois uma argila ativa quando saturada tem o seu valor de coesão muito reduzida e dilatação aumentada, diminuindo o Fator de Segurança da encosta (Fiori e Carmignani, 2015), (Equação 5).

$$AC = \frac{IP}{Argila\%} \quad (5)$$

AC – Atividade Coloidal (%)

De acordo com Skempton (1953) a classificação de argilas inativas, normais e ativas é feita depois do peneiramento do solo em peneira N° 40 (0,42mm), utilizando os seguintes valores de atividade coloidal (Quadro 2).

Quadro 2 – Atividade coloidal das argilas

Denominação	Atividade Coloidal
Argilas inativas	AC<0,75
Argilas normais	0,75<AC<1,25
Argilas ativas	AC>1,25

Fonte: Skempton (1953)

Sobre a atividade coloidal nas vertentes, Oliveira (2005), indica que as contrações e expansões de argilominerais do tipo 2:1 promovem o surgimento de fendas de tração que causam movimentos profundos na encosta. Tais feições servem de passagem de água para o interior da vertente, diminuindo o tempo de saturamento e sua coesão.

Para a classificação morfológica foi utilizado os modelos propostos em Pinto (2015), que distingue a vertente em três partes: convexidade no topo, uma concavidade na base, ambos separados por um ponto de inflexão.

Resultados e discussão

O deslizamento ocorreu na madrugada do dia 30 de setembro de 2013 que apresentou uma intensa precipitação pluvial de 32,20 mm. Os dados obtidos pela Rede de Monitoramento da Secretaria de Desenvolvimento Ambiental – SEDAM, indicaram que nos 10 dias anteriores ao colapso a precipitação foi zero, com exceção dos dias 21, com precipitação de 2 mm e do dia 28 com apenas 0,4 mm de precipitação. Durante todo o período de precipitação que causou o deslizamento, houve picos máximos de velocidade de vento na ordem de 4,68 km/h no sentido nordeste, que condiz no sentido tangencial descendente da vertente, não influenciando no colapso da encosta devido à baixa velocidade do vento (SEDAM, 2016), (Kozciaki, 2005), (Ataíde et al. 2015).

A área do escorregamento apresenta largura média de 11,20 metros por 30 metros de profundidade e 45 metros comprimento com o formato circular, que deslocou um volume de solo de 31.584 m³. O comprimento da vertente era de 46,01 metros e a declividade média em $\alpha = 35,17^\circ$, a menor declividade está na cota altimétrica 50 metros, no sopé da vertente, com $\alpha = 1,9^\circ$ e a maior na cota de 73 metros, no meio da vertente com $\alpha = 69,2^\circ$.

A análise morfométrica indicou que a vertente apresentava as formas côncava, convexa e retilínea, verifica-se na parte inferior da vertente um corte de terraplanagem com finalidade de assentar os trilhos da histórica Ferrovia Madeira Mamoré (Figura 6).

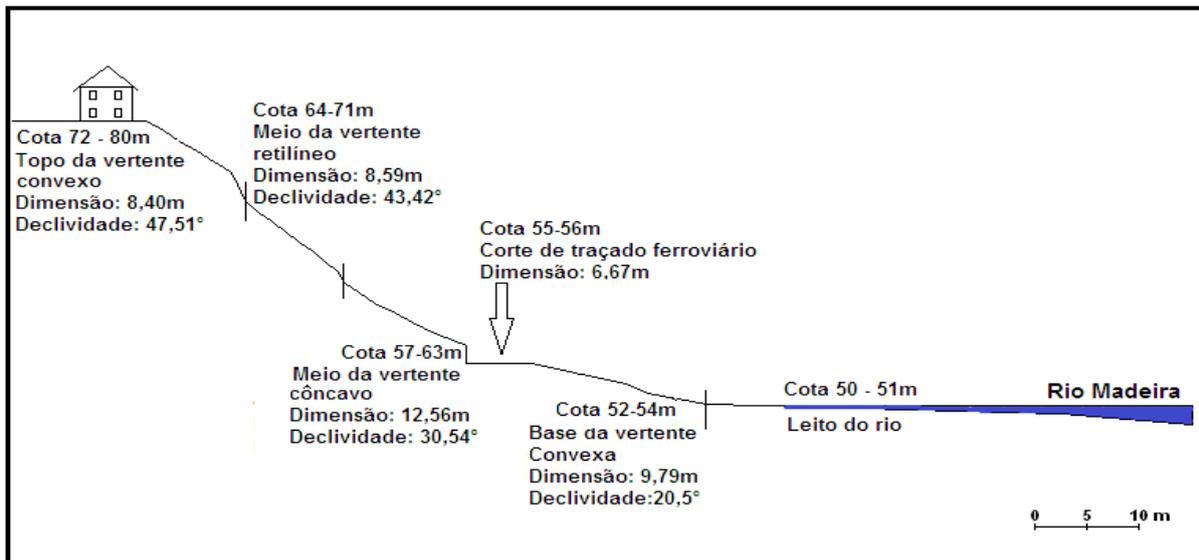


Figura 6 – Perfil morfométrico da vertente.

A vertente exibia em sua base um formato convexo de superfície de agradação com sedimentos aluvionares que delimita o leito do rio Madeira em uma inclinação média de 20,5°. Na cota de 55 a 56 metros do nível do mar foram assentados os trilhos da Estrada de Ferro Madeira Mamoré, que com o colapso da vertente, encontram-se retorcidos devido à força do movimento de massa. O meio da vertente apresenta duas formas: côncava e retilínea com mais de 22 metros de comprimento e uma declividade acima dos 30° que expõe o meio da encosta ao maior nível potencial de erosão e deslizamento, devido ao tamanho e inclinação. O topo da vertente é convexo e

apresenta a maior inclinação da vertente, acima de 47° de média, com pontos que ultrapassam os 69°, que dificulta o fluxo superficial d'água, devido a alta inclinação e a pequena área drenada de 8,40 metros, contudo a infiltração é beneficiada por este modelado de relevo.

A área do colapso da vertente era composta de dois tipos de pacotes de materiais terrosos sotopostos, que cisalharam de forma rotacional. Por esses dois tipos de pacotes serem compostos de materiais fisicamente diferentes entre si, foi necessário obter valores distintos de índices físicos para os pacotes de materiais terrosos, visando abranger a melhor precisão dos valores físicos a serem estabelecidos (Quadro 3 e Gráfico 1).

Quadro 3 – Valores físicos das amostras dos pacotes de materiais da vertente.

Parâmetros	Material Mosqueado	Material Tangencial	Média
γ g/cm ³ (peso do solo)	1,73	1,72	1,72
LL % (limite de liquidez)	31,90	33,20	32,55
LP % (limite de plasticidade)	26,50	32,17	29,33
IP % (índice de plasticidade)	5,40 (levemente plástico)	1,03 (levemente plástico)	3,21
IC (índice de consistência)	5,4 (dura)	2,26 (dura)	3,83
Tg ϕ (ângulo de atrito interno)	29,5°	30°	30°
C kg/cm ² (coesão)	21,43	8,97	15,20
AC (Atividade Coloidal)	0,10 (argila normal)	0,07 (argila inativa)	-
Areias %	13,00	28,00	-
Silte %	36,20	57,50	-
Argila%	50,80	14,50	-

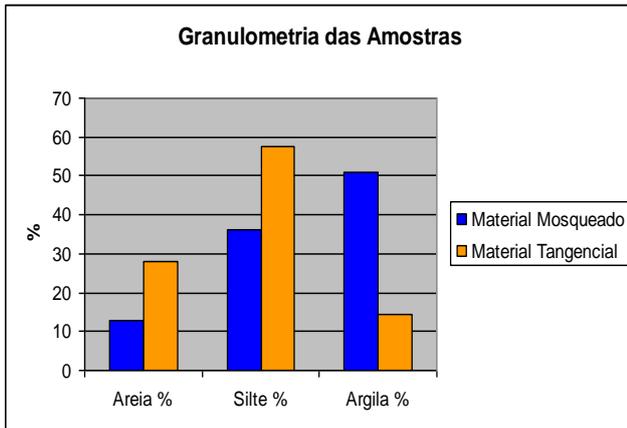


Gráfico 1 – Granulometria dos Materiais.

Para isto, chamamos o pacote de material que constituía a base da vertente de Material Silto Arenoso Tangencial, devido à classificação textural e às estruturas das camadas, que estão arranjadas de forma tangencial à declividade da vertente. E de Material Argilo Siltoso Mosqueado o pacote superior da vertente, devido a sua textura e aos nódulos endurecidos de óxido de ferro presentes.

No Pacote de Material Silto Arenoso Tangencial, verifica-se que a densidade aparente do solo é em média de 1,72 g/cm³ condizente com os valores de solos siltosos e arenosos mal manejados (TINÓS et al. 2014).

Em análise granulométrica verifica-se que há diferenças texturais entre os dois tipos de materiais (Gráfico 1).

O material inferior da vertente, apresenta predominância de silte (57,50%) e areia (28%), essas características texturais comprovam os baixos valores do índice de plasticidade (IP = 1,03%), o valor de plasticidade é de zero para areias, o que influi diretamente na coesão, que também, é baixa (C= 8,97 kg/cm²). Este pacote inferior rico em silte e areia apresenta ser um saprolito com estruturas ainda preservada da rocha-matriz em lâminas tangenciais de estratificação cruzada intemperizadas em cores, vermelho, amarelo e roxo de provável afloramento das rochas do complexo Jamari devido à falha transversal ao megalineamento Madre-Dios Itacoatiara, que soergueu nesta parte, à margem direita do rio Madeira à jusante da cachoeira de Santo Antônio (Figura 7). A Atividade Coloidal (0,07) classifica a baixa quantidade existente de argila como inativa, não colaborando com processos de expansão ou contração deste material inferior, Silto Arenoso Tangencial, que está sotoposto a um pacote de material de maior peso e coesão com nódulos mosqueados de óxidos.



Figura 7 – Pacote inferior Sito Arenoso Tangencial.

O material superficial apresenta predominância de argila (50,80 %) e de silte (36,20%), características que comprovam o baixo índice de plasticidade (IP= 5,4%), pois o silte tem baixa plasticidade. Mas a argila por possuir

nódulos endurecidos de óxido de ferro (CPRM, 2007), torna a consistência da argila alta (IC = 5,4) e influencia diretamente a coesão (C= 21,43 kg/cm²). A Atividade Coloidal (0,10) da argila é classificada como normal, de pouca expansão, o que em parte torna estável todo este material

superior, Argilo Siltoso Mosqueado. Por apresentar alta coesão este pacote tem a função de proteger a vertente contra os processos erosivos e de movimentos de massa.

Constata-se que ambos os materiais apresentam o Limite de Liquidez no valor dos 30%, que colabora para aplicação de métodos de fator de segurança de solos com valores uniformes, principalmente no LL, em que a força de cisalhamento é considerada zero, aplicável em toda a vertente (Fiori e Carmignani, 2015).

Através dos dados de granulometria e visitas em campo, pôde-se verificar que um aspecto que influenciou a deflagração do deslizamento foi a ocorrência de uma erosão superficial causada por uma galeria de água

pluvial que transfixou o material Argilo Siltoso Mosqueado, que expôs o pacote Silte Arenoso Tangencial, que é menos coesivo, a forte recarga hídrica que o saturou. Por ter um índice de plasticidade muito baixo, este material não suportou a pressão neutra solicitada e movimentou-se em um estado semi-líquido, que pôs toda a vertente em colapso.

Verifica-se que em áreas adjacentes não há deslizamentos recentes diagnosticáveis, visto que, a camada inferior não está exposta.

Em visitas a campo, foram observados os flancos da encosta e foi possível distinguir as formações dos materiais e reconstituir a sua formação textural e o nível piezométrico pretérito ao colapso (Figura 8).

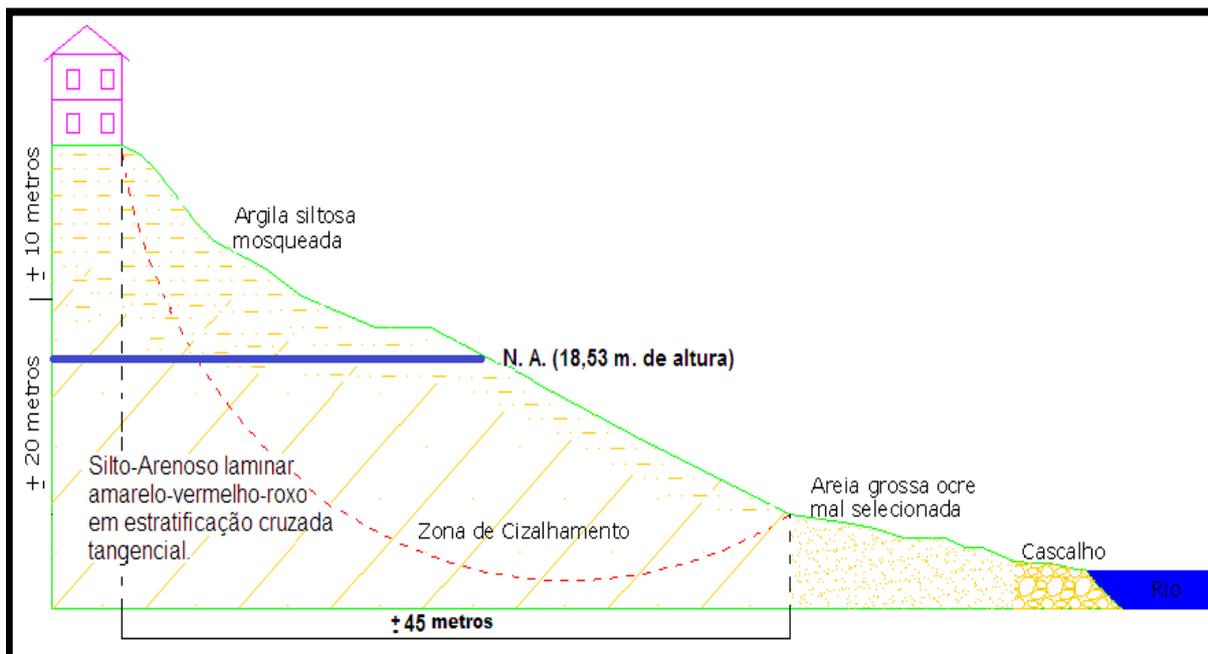


Figura 8 – Perfil dos pacotes de materiais da vertente e nível d'água para desencadear o colapso na vertente.

O pacote de argila siltosa mosqueada apresentava espessura média de 10 metros na crista que está sotoposta a uma fina camada orgânica. Verifica-se na Figura 9, no detalhe, os

nódulos endurecidos de oxi-hidróxido de ferro, que caracterizam a aparência mosqueada, que influenciam na coesão, visto que os minerais oxidados tendem a cimentar todo o material ao seu redor (Guidicini e Nieble, 1984).



Figura 9 – Pacote de argila siltosa mosqueada.

In locu verificou-se no centro do deslizamento uma galeria pluvial com peças de concreto descarregando constante esgoto. O que deixa de ser caracterizado como galeria pluvial para ser considerada uma galeria de água servida (Figura 2 e 9).

Abaixo do pacote de Argila Siltosa Mosqueada encontra-se o pacote inferior da vertente, composta de material saprolítico Silto

Arenoso Tangencial de origem do Complexo Jamari de aproximadamente 20 metros de espessura com presença de bioturbação (Figura 7).

No sopé da encosta encontra-se a camada de areia grossa ocre mal selecionada com espessura de aproximadamente de 2,5 metros, que é um depósito de sedimento aluvionar recente com conteúdo fossilífero de troncos, galhos e folhas (Figura 10).



Figura 10 – Areia grossa ocre mal selecionada no sopé da vertente.

Abaixo da camada de areia grossa ocre, já no leito maior do rio Madeira, encontra-se a

camada de cascalho de matriz arenosa coberto por conteúdos fossilífero (Figura 11).



Figura 11 – Cascalho coberto por conteúdo fossilífero.

Nível piezométrico da vertente pelo método de equação empírica

Adotou-se como fator de Segurança o valor *a priori* de 1,49, pertencente à classe 2, o

mais conservador do nível instável, de acordo com DNER (1996), para esta equação:

$$1,49 = \frac{15,2 + \left[\left(1,72 - \frac{h_w}{30} \cdot 0,99 \right) 30 \cdot \cos 35,17 + 3,6 \cdot \cos 35,17 \right] \operatorname{tg} 30^\circ}{(30 \cdot 1,72 + 3,6) \operatorname{sen} 35,17 + 0} \rightarrow 18,53$$

Ao aplicar um coeficiente de fator de segurança mais conservador, para deflagrar o colapso do solo (FS = 1,49 da Classe 2) foi necessário um nível piezométrico de 18,53 metros, que equivale à 61,66 % da altura da vertente para desencadear o movimento. Nesta altura a saturação pela água não precisa atingir o pacote de material superior (Argilo Siltoso Mosqueado), para haver o deslizamento da encosta. O que indica que apenas uma forte recarga freática no pacote de material Silto Arenoso Tangencial foi suficiente para causar o deslizamento.

O movimento de massa ocorreu apenas neste local, devido à forte saturação hídrica do material Silto Arenoso Tangencial, que deslizou, por não haver o material Argilo Siltoso Mosqueado sotoposto a este para protegê-lo, causado por uma erosão superficial acelerada e pontual de uma galeria de drenagem pluvial.

Conclusão

A equação proposta por Fiori e Carmignani (2015), apresentou o valor mínimo do nível piezométrico para desencadear um deslizamento de 18,53 metros de altura com um

fator de segurança mínimo (*a priori*) de 1,49. Este valor, mais conservador, indica que a elevação do lençol freático em 61,66% da altura da vertente pôde saturá-la ao ponto de desencadear todo o processo de deslizamento.

A vertente possuía um formato convexo na crista e um formato côncavo na base, seccionados por um formato retilíneo e convexo em seu meio. O comprimento da encosta era de 46,01 metros em uma inclinação média de 35,17°. Atesta-se que a vertente tinha uma inclinação acima da média para as encostas vizinhas da mesma margem do rio Madeira com a mesma extensão. Esta elevada inclinação deve-se a uma falha transversal ao megalineamento Madre de Dios-Itacoatiara de movimento vertical, que causou uma formação milonítica das rochas do Complexo Jamari e expondo-as à superfície. Devido ao intemperismo químico, o que se revela em toda a base da vertente é um saprolito que herda as estruturas da rocha-matriz.

Um aspecto que influenciou o deslizamento foi à erosão superficial acelerada causada pela galeria de água pluvial, que uma vez rompida, iniciou a erosão do pacote superficial da vertente, o material Argilo Siltoso Mosqueado que protege a encosta, pois esse material apresenta

maior coesão (21,43 Kg/cm²) e maior plasticidade (IP= 5,4), devido a predominância de argila de atividade coloidal normal (0,10) em sua composição. Tal situação contrasta com o pacote de material inferior, Sítio Arenoso Tangencial, que apresenta menor coesão (8,97 Kg/cm²), menor plasticidade (IP= 1,03), menor atividade coloidal (0,07 inativa) e predominância de silte e areia.

Após a completa erosão do pacote superior na área de incisão d'água da galeria pluvial, houve a exposição pontual do pacote inferior, que após sofrer forte recarga pluvial de 32,20 mm ocorrida no dia 30/09/2013 e a elevação do nível piezométrico de no mínimo de 18,53 metros de altura, o material Silto Arenoso Tangencial saturou-se, comportando-se de maneira semi-líquida, não resistindo a pressão neutra, causada pela baixa plasticidade e coesão. Devido este material ser todo o alicerce da encosta, a mesma ultrapassou o nível de equilíbrio limite (FS= 1,5) e colapsou, causando o deslizamento de toda a vertente.

Verifica-se a importância de manter a integridade do material superior da vertente na margem direita do Rio Madeira, no perímetro urbano de Porto Velho, visando a diminuição das forças cisalhantes e de processos erosivos acelerados, que podem desencadear vários deslizamentos nas vertentes ao longo do curso do Rio.

Ratifica-se a importância da Mecânica dos Solos para uma compreensão holística dos movimentos de massa. A integração de índices físicos de solos com a morfometria da vertente em grande escala, colaborou para a compreensão dos processos erosivos superficiais, fomentada pela morfologia da encosta. Aliás, permitiu a compreensão dos limites de saturação e do comportamento dos materiais terrosos da vertente, frente as tensões cisalhantes que causaram o colapso da encosta. Como também de evidenciar a influência antrópica na modelagem do relevo, como um agente externo.

Em vista disso, fica evidente a contribuição dos estudos de Mecânica dos Solos para a compreensão da dinâmica erosiva do relevo, como também, colabora para o entendimento dos processos superficiais e subsuperficiais hídricos das vertentes.

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Rondônia – UNIR e do Laboratório de Geomorfologia e Pedologia do

Departamento de Geografia da Universidade Federal de Rondônia – UNIR.

Referências

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984a. Norma Brasileira – NBR 6459, Determinação de Limite de Liquidez. Método de Ensaio. Brasília.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984b. Norma Brasileira – NBR 7180. Determinação do Limite de Plasticidade. Método de Ensaio. Brasília.
- Ataíde, G. M., Castro, R. V. O., Correia, A. C. G., Reis, G. G., Reis, M. G. F., Rosado, A. M., 2015. Interação Árvores e Ventos: aspectos ecofisiológicos e silviculturais. *Ciência Florestal* 25, 523-536.
- DNER, Departamento Nacional de Estrada de Rodagem, 1996. Manual de Pavimentação. 2ª Edição. Rio de Janeiro.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2017. 3ª ed., Manual de Métodos de Análise de Solo. DF.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2007. Serviço Geológico do Brasil. Geologia e Recursos Naturais do Estado de Rondônia (texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais do estado de Rondônia 1:1.000.000. Porto Velho.
- Caputo, H. P., 2015. Mecânica dos solos e suas aplicações: mecânica das rochas, fundações e obras de terra. Volume 1 e 2. 7ª edição. Livros Técnicos e Científicos Editora, RJ.
- Danna, J. D., 1864, Manual of Geology: Treating of the Principles of the Science with Special Reference to American Geological History for the Uses of Colleges, Academies and Schools of Science. Theodore Bliss Ed. Philadelphia.
- Deluca, D, L.; Versace, P., 2016. A General Formulation to Describe Empirical Rainfall Thresholds for Landslides. *Procedia Earth and Planetary Science* 16, 98-107
- Fiori, A. P. Carmignani, L., 2015. Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas: Aplicações na estabilidade de taludes. 3ª Edição. Ed. UFPR – Oficina de Textos. São Paulo.
- Folador, R. M., Silveira, C. T., Fiori, A. P., 2018. Cálculo da Probabilidade e Quantificação do Volume de Material Suscetível a Escorregamentos – Bacia do Rio Jacaré,

- Morretes – PR. Boletim Paranaense de Geociências 74, 1, 47-56.
- Gerscovich, D. M. S., 2016. Estabilidade de Taludes. 2ª edição. Ed. Oficina de Textos. São Paulo.
- Gerra, A. J. T. Marçal, M. S., 2006. Geomorfologia Ambiental. 1ª edição. Ed. Bertrand Brasil. Rio de Janeiro.
- Guidicini, G. Nieble, C., 1984. Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. Ed. Edigard Bulcher. 2ª ed. São Paulo.
- Hungr, O.; Evans, S. G.; Bovis, M. J.; Hutchinson, J. N. A., 2001. Review of the Classification of Landslides of the Flow Type. Environmental and Engineering Geoscience 7, 3, 221-238.
- Hussain, Y.; Cardenas-Soto, M.; Uagoda, R.; Martino, S.; Rodriguez-Rebolledo, J.; Hamza, O.; Martinez-Carvajal, H.; 2019. Monitoring of Sobradinho landslide (Brasília, Brazil) and a prototype vertical slope by time-lapse interferometry. Brazilian Journal of Geology 49, 2, 1-15.
- Kozciak, S., 2005. Análise da Estabilidade de Vertentes na Bacia do Rio Marumbi – Serra do Mar – Paraná. Tese (Doutorado) 141p. Curitiba, Universidade Federal do Paraná – UFPR.
- Li, Y.; Mo, P., 2019. A Unified Landslide Classification System for Loess Slopes: a critical review. Geomorphology 340, 1, 67-83.
- Lima, D. L. S.; Cordeiro, A. M. N.; Bastos, F. H., 2015. Agentes Condicionantes e Desencadeadores de Movimentos Gravitacionais de Massa na Vertente Úmida do Maciço de Uruburetama, Ceará, Brasil. Revista Brasileira de Geografia Física 8, 4, 1142-1157.
- Oliveira, M. A. T., 2005. Processos Erosivos e Preservação de Áreas de Risco de Erosão por Voçorocas. in: Guerra, A. T. Silva, A. S. Botelho, R. G. M (Org.). Erosão e Conservação dos Solos: conceitos, Temas e Aplicações. 2ª edição. Ed. Bertrand Brasil. Rio de Janeiro.
- Pinto, R. W. P., 2015. Evolução do Pensamento Geomorfológico Sobre a Evolução das Vertentes. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro, PUC – RIO.
- Polivanov, H; Barosso, E. V., 2011. Geotecnia Urbana (5), in: GUERRA, A. J. T. (Org.) Geomorfologia Urbana. Ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro.
- Reichenbach, P.; Rossi, M.; Malamud, B. D.; Mihir, M.; Guzzetti, F., 2018. A Review of Statistically-Based Landslide Susceptibility Models. Earth-Science Reviews 180, 60-91.
- Riffel, S. E., Guasselli, L. A., Bressni, L. A., 2016. Desastres Associados a Movimentos de Massa: Uma Revisão de Literatura. Boletim Goiano de Geografia 36, 2, 285-101.
- Rizzotto, G. J.; Oliveira, J. G. F. De; Quadros, M. L. Do E. S.; Castro, J. M. R. De; Cordeiro, A. V.; Adamy, A. Dantas, M. E.; Melo Junior, H. R., 2005. Projeto Rio Madeira. Estudo de viabilidade para implantação de usinas hidrelétricas no rio Madeira. Relatório Parcial UHE Jirau. Porto Velho.
- Santos, C. L.; Listo, F. L. R.; Silva, O. G.; Reis, R. B.; 2018. Análise Metodológica de Estudos Referentes a Eventos de Movimentos de Massa e Erosão Ocorridos na Região Nordeste do Brasil. Caderno de Geografia 28, 55, 1-12.
- SEDAM, Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental, 2016. Boletim Climatológico de Rondônia. Coordenadoria de Geociências. Porto Velho. Disponível em: www.ro.gov.br/sedam/meteorologia . Acesso: 12 jun. 2019.
- Sharp, C. F. S., 1938. Landslides and Related Phenomena: A Study of Mass Moviment of Soil and Rock. Columbia University Press. New York.
- Singh, R., Umrao, R. K., Singh, T. N., 2017. Hill Slope Stability Analysis Using Two and Three Dimensions Analysis: A Comparative Study. Journal Geological Society of India. 89, 295-302.
- Silva, M. F., 2014. Análise Morfoestrutural da Folha Porto Velho SC20 V-B-V, como Subsídio a Delimitações de Traçados de Estradas e Rodovias. Dissertação (Mestrado). Porto Velho, Universidade Federal de Rondônia – UNIR.
- Skempton, A. W., 1953. The Colloidal Activity of Clays. 3rd Institute Soil Mechanics and Foundation engineering. 1, 57-61.
- Tabalipa, N. L. Fiori, A. P., 2008. Influência da Vegetação na Estabilidade de Taludes na Bacia do Rio Ligeiro (PR). Revista Geociências – UNESP, 27, 3, 387-399.

Terzaghi, K; Peck, R., 1948. *Mechanics in Engineering Practice*. Ed. John Wiley and Sons. N.Y.

Tinós, T. M., Ferreira, M. V., Reidel, P. S., Zaine, J. E., 2014. Aplicação e Avaliação de Metodologia de Classificação Automática de Padrões de Formas Semelhantes do Relevo. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, São Paulo, 15, 3, 353-370.

Varnes, D. J., 1978. Slope Movement Types and Processes. In: *Special Report, Landslides: analysis and contrl.* Ed. Shuster. National academy of science. Washington; D. C.

Vaz, A. P. M. S., Fiori, A. P., Silveira, C. T., 2018. Métodos de Obtenção de Valores de Ângulo de Atrito e Coesão: comparação entre o ensaio de cisalhamento direto e cálculo baseado no SPT. *Boletim Paranaense de Geociências* 74, 01, 1-10.