

**INSTRUMENTAÇÃO DE ESCORREGAMENTO SIMULADO EM  
LABORATÓRIO COM ACELERÔMETROS VISANDO O  
DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE ALERTA DE DESASTRES  
ANTECIPADO**

Malena D'Elia Otero <sup>1</sup>; Ana Elisa Silva de Abreu<sup>2</sup>; Eduardo Soares de Macedo <sup>3</sup>, Marcela Penha Pereira Guimarães <sup>4</sup>, Alessandra Cristina Corsi <sup>5</sup>, Amin Askarinejad <sup>6</sup>

**Resumo** – Os sistemas de alerta antecipados para prevenção de desastre associados a escorregamentos se baseiam no monitoramento de variáveis como o deslocamento do solo. A predição do instante de ruptura de uma encosta constitui o objetivo destes sistemas de alerta, pois permite evitar perdas humanas e materiais. Uma das formas de se estimar o instante da ruptura é considerar que ela ocorre quando o inverso da velocidade ao longo do tempo tende ao valor zero. Como deslocamentos podem acontecer muito próximos ao instante da ruptura, é necessário utilizar instrumentos de alta resolução para esta previsão. Nesta pesquisa, foram utilizados acelerômetros para monitorar escorregamentos simulados em uma caixa de ensaios. Foi estabelecido um protocolo de análise dos dados de aceleração e de cálculo de velocidade a partir dos mesmos. Neste trabalho, são apresentados os resultados de um ensaio de simulação de escorregamento em condições molhadas, que mostrou o elevado potencial dos acelerômetros para detectar sinais antecedentes à ruptura macroscópica do solo, embora o procedimento de cálculo de velocidade a partir da aceleração tenha sido insatisfatório.

**Abstract** – Landslide early warning systems are based on soil variables monitoring, such as displacement. The main goal of an early warning system is to predict slope rupture moment, as it can reduce human and material losses. One way to estimate the failure moment is when the inverse of velocity it's approximately zero. Because displacement can happen very close to the rupture moment, it's important to use high resolution monitoring sensors, like accelerometers. In this research, accelerometers were used to monitor a slope built in a landslide simulation flume. A data processing procedure was developed to analyzed acceleration data and to estimate velocity from it. In this paper, results from a wet landslide experiment simulation are presented. Results show that accelerometers are likely to be used to detect pre-failure signals although velocity calculation procedure was inconsistent.

**Palavras-Chave** – Monitoramento geotécnico; Sensores; Escorregamento; Risco Geológico

---

1 Geól., MSc, Universidade Estadual de Campinas, (11) 99373-3053, [malena.delia.otero@gmail.com](mailto:malena.delia.otero@gmail.com)

2 Professora, Universidade Estadual de Campinas, (19) 3521-4575, [aeabreu@unicamp.br](mailto:aeabreu@unicamp.br)

3 Pesquisador, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, (11) 3767-4370, [esmacedo@ipt.br](mailto:esmacedo@ipt.br)

4 Pesquisadora, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, (11) 3767-4770, [marcelppg@ipt.br](mailto:marcelppg@ipt.br)

5 Pesquisadora, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, (11) 3767-4352, [accorsi@ipt.br](mailto:accorsi@ipt.br)

6 Professor, Universidade Tecnológica de Delft, (+31)1527-83326, [a.askarinejad@tudelft.nl](mailto:a.askarinejad@tudelft.nl)

## 1. INTRODUÇÃO

Sistemas de alerta para prevenção de desastres associados a escorregamentos são baseados no monitoramento de precursores do movimento, como variação de poro pressão, pluviosidade e deslocamento de massas potencialmente instáveis, dentre outros.

A predição do tempo de ruptura razoavelmente acurada se constitui como um objetivo importante a ser alcançado dentro do gerenciamento de riscos de desastres associados a escorregamentos uma vez que permite evitar perdas humanas, reduzir danos a propriedades e planejar medidas adequadas de resposta (Federico et al. 2012).

Dentro dos modelos matemáticos para predição de ruptura, destaca-se o “inverso da velocidade ao longo do tempo”, estabelecido por Fukuzono (1985). Estima-se o tempo de ruptura a partir da plotagem do inverso da velocidade, calculada com dados de deslocamento medidos *in situ*, ao longo do tempo. Estima-se que a ruptura ocorrerá quando o valor do inverso da velocidade atingir o zero.

Segundo Carlá et al. (2017), trata-se de um método consagrado devido, principalmente, à sua simplicidade para aplicação e é amplamente utilizado para casos de predição de ruptura em maciços rochosos. No entanto, os autores ressaltam que o método apresenta limitações e sua aplicação em casos reais requer experiência do usuário. O método pode ser apenas utilizado em maciços que rompem em concordância com a teoria de rastejo em aceleração (do inglês, *acceleration creep*) e assume que a velocidade na ruptura é infinita.

De acordo com Askarinejad et al. (2018), os deslocamentos que antecedem uma ruptura em encostas constituídas por materiais arenosos podem ocorrer relativamente próximos à deflagração do movimento de massa em si, de maneira tal que se justifica a necessidade de fazer uso de instrumentos de medição de alta resolução, como acelerômetros, para que se possa desenvolver um sistema de alerta antecipado.

O uso de acelerômetros para fins de monitoramento de estabilidade de encostas é inovador. Ooi et al. (2014) e Giri et al. (2018) demonstraram o potencial de usar estes sensores para caracterização qualitativa de escorregamentos simulados em laboratório. Estes autores defendem, ainda, como vantagem adicional dos acelerômetros, seu baixo custo quando comparado com outros dispositivos consagrados no meio geotécnico. No entanto, não é prática comum no monitoramento geotécnico utilizar medidas de aceleração para estabelecer níveis de alerta.

No presente trabalho, foi simulado em laboratório um escorregamento em escala reduzida, em uma caixa experimental, utilizando um solo arenoso. A encosta construída foi monitorada durante o ensaio com acelerômetros, com o objetivo de identificar sinais prévios à ruptura, não observados macroscopicamente. Este artigo apresenta o resultado de uma destas simulações e o procedimento utilizado para análise dos dados de aceleração e cálculo de velocidade, com o objetivo de verificar a possibilidade de utilizar acelerômetros em sistemas de alerta antecipado de escorregamentos.

## 2. MÉTODO

### 2.1. Caixa de simulação de escorregamento e instrumentação

O ensaio de simulação de escorregamento foi realizado numa caixa experimental (Figura 1), de dimensões 160 x 50 x 50 cm, confeccionada em chapa metálica e com uma lateral de vidro para permitir a observação do movimento simulado. A caixa é equipada com um macaco hidráulico de 5t que permite sua inclinação até 45°. A lateral de vidro é dividida em três janelas de observação, as quais serão denominadas ao longo deste trabalho como: “terço inferior”, “terço intermediário” e “terço superior”. No entanto, não há nenhum tipo de divisão interna na caixa.

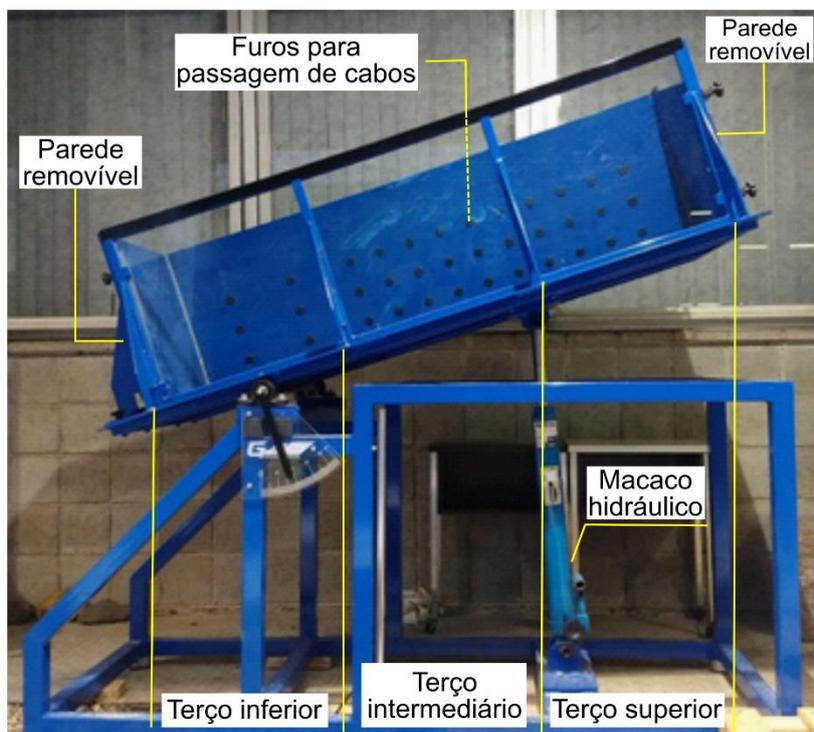


Figura 1 – Caixa de simulação de escorregamentos utilizada na pesquisa (Fonte: D’Elia-Otero, 2020).

Para o monitoramento da aceleração, foram utilizados acelerômetros da marca *Analog Devices*, modelo ADXL 321 (Figura 2), os quais consistem em acelerômetros biaxiais, que medem acelerações dentro de uma faixa de amplitude de  $\pm 18g$ . Na presente pesquisa, trabalhou-se com uma frequência de aquisição de 4000Hz, mas ressalta-se que podem ser utilizados com outras frequências mais altas ou mais baixas, a depender da configuração programada pelo usuário para as frequências de aquisição, armazenamento e transmissão dos dados. Os eixos destes acelerômetros são denominados neste trabalho de “componente  $u$ ”, no sentido do movimento e “componente  $v$ ”, ortogonal a  $u$ . A transmissão dos dados coletados se dá por cabos conectados a um *data logger*, o qual, por sua vez, é conectado a um computador.

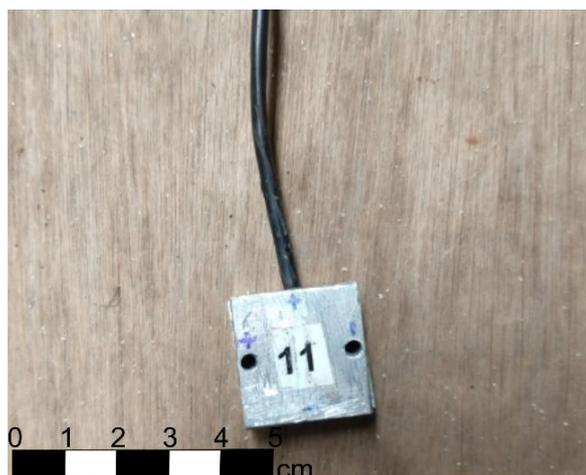


Figura 2 – Acelerômetro encapsulado utilizado na pesquisa (Fonte: D’Elia-Otero, 2020).

## 2.2. Ensaio de simulação de escorregamento

O procedimento para realização do ensaio de simulação de escorregamento consistiu em instalar uma mangueira perfurada na base da caixa para propiciar a saturação do solo de maneira ascendente. A mangueira foi coberta com um geotêxtil de 160 x 50 cm para evitar carreamento de

partículas do solo. O preenchimento da caixa com o solo foi realizado em camadas de 5cm, até a espessura total de 30cm. Cada camada foi compactada com um soquete de madeira até atingir a densidade máxima do solo ( $1,56\text{g/cm}^3$ ).

Os acelerômetros foram instalados conforme a caixa era preenchida com o solo: abria-se uma pequena cava, instalava-se o dispositivo e depois este era reaterrado e o solo novamente compactado. Foram instalados cinco acelerômetros dentro do solo em profundidades diferentes e um acelerômetro foi instalado na lateral externa da parede de metal, com a função de ser uma referência de aceleração sem movimento de solo. O posicionamento dos sensores na caixa é apresentado na Figura 3. Após o preenchimento da caixa com solo e a instalação de todos os acelerômetros, esses instrumentos foram calibrados para estabelecer uma referência do início do ensaio.

Atingida a espessura de 30 cm de solo, com a caixa na posição horizontal, procedeu-se à saturação do mesmo. Posteriormente, para facilitar a deflagração do escorregamento, um talude foi construído por escavação manual no terço inferior da caixa.

Após a construção do talude, a caixa foi inclinada até  $30^\circ$  sem fornecimento de água. Quanto atingiu essa inclinação, o fornecimento de água foi ligado e iniciou-se a aquisição dos dados de aceleração até acontecer a ruptura macroscópica do solo. O experimento foi realizado com vazão constante de 4,4 L/min.

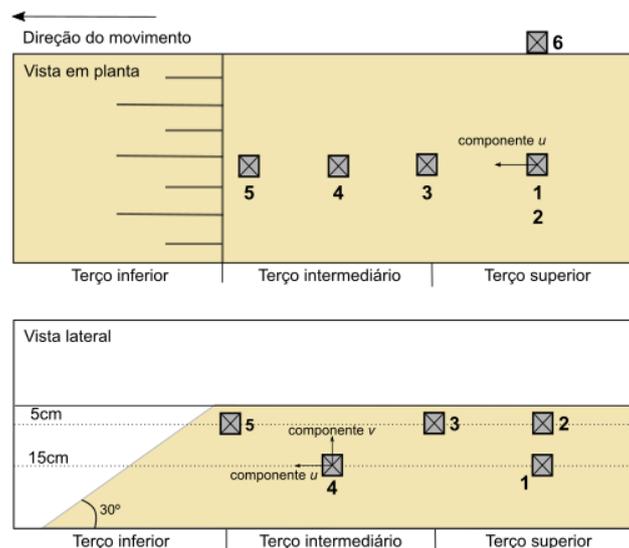


Figura 3 – Posicionamento dos acelerômetros durante o ensaio

### 2.3. Cálculo de velocidade a partir da aceleração

Os dados de aceleração foram analisados no domínio do tempo. Para o processamento foram desenvolvidos dois códigos em linguagem Python: um para filtragem de ruídos dos dados e outro para calcular as velocidades a partir dos dados de aceleração.

Para a filtragem dos sinais, optou-se por utilizar um filtro do tipo Butterworth, de 4ª ordem, com frequência de corte de 1Hz. A escolha das características do filtro se baseou na análise qualitativa dos dados de entrada e de saída. Buscou-se utilizar a melhor configuração possível sem que se perdessem informações importantes dos dados brutos.

O procedimento para calcular a velocidade a partir dos dados de aceleração consiste em integrar a aceleração ao longo do tempo. Primeiramente, deve-se considerar que mesmo quando não há movimentação do solo são coletados dados de aceleração. Esta aceleração medida corresponde à aceleração da gravidade (campo gravitacional terrestre) em cada componente do acelerômetro.

Portanto, para calcular a velocidade, deve ser calculada em primeiro lugar a aceleração exclusiva do movimento do solo. Para tanto, os dados brutos de aceleração devem passar por duas etapas de filtragem: a primeira, para remover *outliers* (com o mesmo filtro tipo Butterworth utilizado no primeiro procedimento) e a segunda, para remover o *offset* (com filtro de média móvel de janela

centralizada de 10s). O resultado da primeira etapa é chamado neste trabalho de “dados filtrados” e o da segunda etapa, de “dados suavizados”. Os dados suavizados são calculados a partir dos dados filtrados. Subtraindo-se os dados suavizados dos dados filtrados se obtém a aceleração exclusiva do movimento do solo. Finalmente, essa aceleração é integrada no tempo para cálculo da velocidade. A Figura 4 apresenta o fluxograma de etapas do procedimento descrito, que é em linhas gerais o mesmo utilizado por D’Elia-Otero (2020), porém neste artigo utilizados outras configurações de filtro, de tal forma que os resultados são diferentes daqueles apresentados em D’Elia Otero (2020).

No entanto, é importante destacar que para utilizar este procedimento se assume a premissa de que antes de ocorrer a ruptura, o solo se movimenta aproximadamente ao longo do mesmo plano, sem haver movimentação dos eixos dos acelerômetros para as laterais. Após a ruptura macroscópica, esta premissa não é mais válida porque os acelerômetros podem mover-se livremente e inclusive rotacionar.

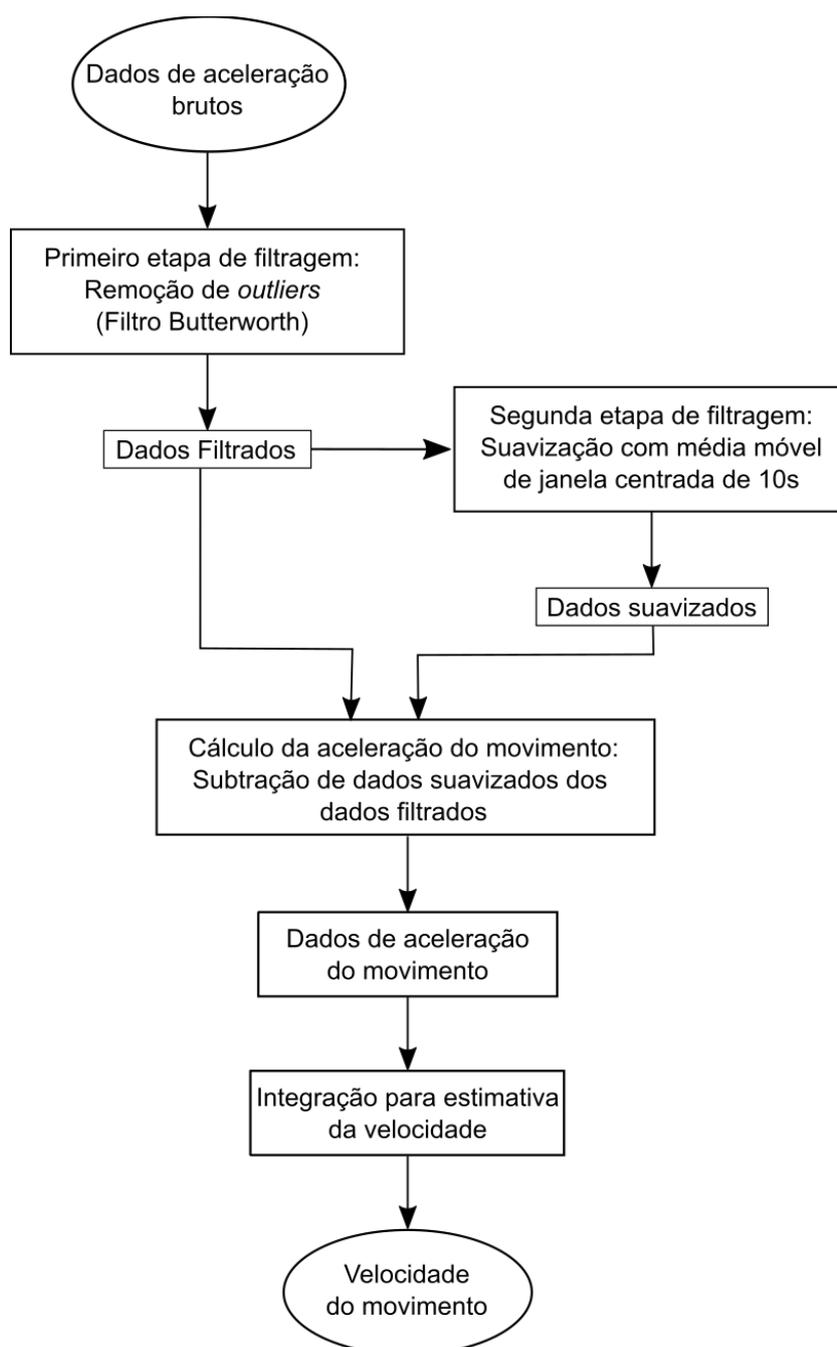


Figura 4 – Fluxograma de etapas do procedimento de cálculo de velocidade a partir dos dados de aceleração (Fonte: D’Elia-Otero, 2020).

### 3. RESULTADOS

Nas condições da realização do ensaio, foi simulado um escorregamento profundo que se desenvolveu a partir de trincas na superfície. As trincas apareceram inicialmente na região entre os terços inferior e intermediário da caixa e foram se propagando em direção ao terço superior, até ocorrer a ruptura total, decorridos 81 segundos do início do ensaio. Houve a formação e desprendimento de um bloco de solo no terço intermediário entre 40 e 50s do ensaio. Após se desprender, o bloco se manteve no local até a ruptura total do talude. A Figura 5 apresenta imagens tiradas no terço intermediário da caixa que ilustram a evolução do movimento simulado.



Figura 5 – Evolução do escorregamento simulado. A) Desenvolvimento de trinca a partir da superfície aos 15s; B) Desprendimento de bloco entre 40 e 50s; C) Ruptura total aos 81s. Todas as fotos foram tiradas no terço intermediário da caixa.

Todos os acelerômetros se movimentaram junto com o solo e cada um identificou sinais prévios à ruptura global macroscópica em instantes diferentes, em função do posicionamento dentro da caixa. A resposta de cada um evidencia a evolução do movimento. Os acelerômetros 1, 2 e 5 apresentaram comportamento de aceleração semelhante: a aceleração começa a variar a partir de 5s a 15s do início do ensaio, até ocorrer a ruptura total do talude. Os acelerômetros 3 e 4, localizados no terço intermediário, refletiram a formação e o desprendimento do bloco.

São apresentados aqui os resultados de aceleração medida e de velocidade calculada para os acelerômetros nº 1, localizado no terço superior e nº 6, que corresponde ao acelerômetro usado como referência de ausência de movimento por estar localizado na parede externa da caixa. Não são apresentados os gráficos dos acelerômetros localizados no bloco desprendido porque durante o desprendimento do bloco estes rotacionaram e, portanto, o procedimento de cálculo de velocidade não pode ser aplicado. Os gráficos de aceleração apresentam no eixo vertical a aceleração (em  $g$ ) e o tempo (em segundos) no eixo horizontal.

A Figura 6 mostra que no caso do acelerômetro nº 1, a aceleração começou a variar nas duas componentes a partir de 15s desde o início do ensaio. A ruptura macroscópica ocorreu aos 81s, conforme indicado na Figura 6. A Figura 7 apresenta os resultados obtidos com o acelerômetro nº 6: a aceleração se mantém constante em ambas componentes, como era esperado. A aceleração medida nas componentes do acelerômetro nº 6 não é nula pois corresponde à aceleração do campo gravitacional terrestre em cada eixo.

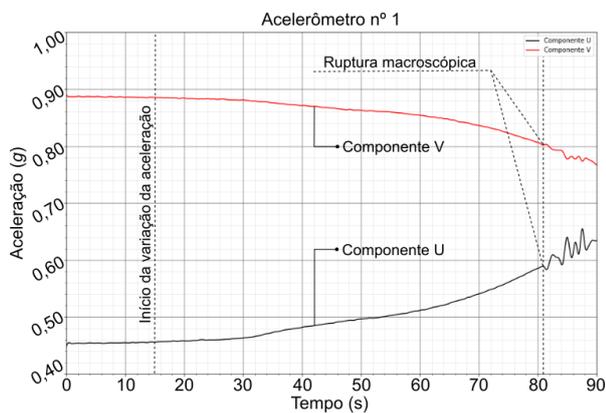


Figura 6 – Acelerômetro nº1: aceleração medida ao longo do tempo em cada componente.

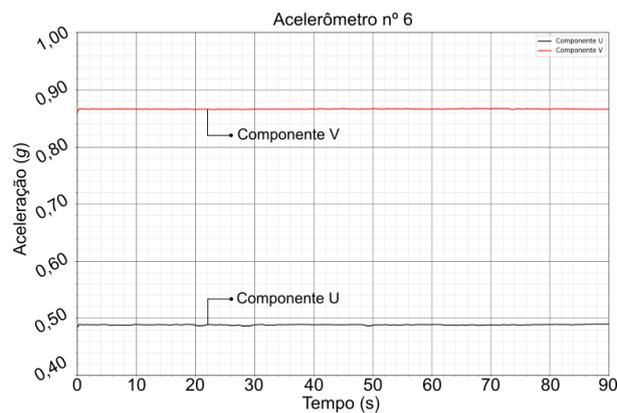


Figura 7 – Acelerômetro nº6: aceleração medida ao longo do tempo em cada componente.

As Figuras 8 e 9 apresentam a velocidade calculada em cada componente a partir das acelerações medidas com os acelerômetros nº 1 e nº 6. Os gráficos de velocidade mostram no eixo vertical a velocidade (em m/s) e o tempo, em segundos, no eixo horizontal.

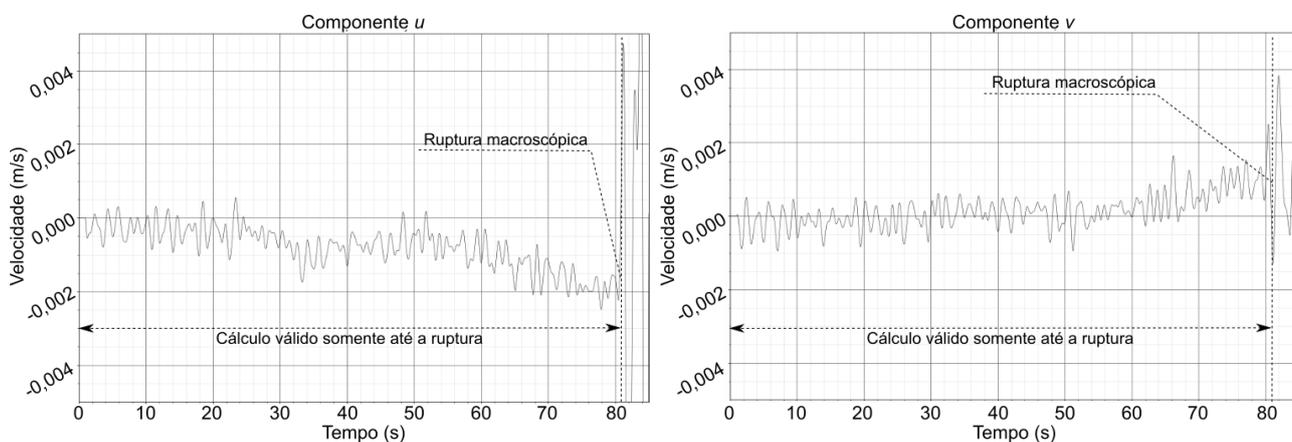


Figura 8 – Acelerômetro nº 1: velocidades calculadas nas componentes  $u$  e  $v$ .

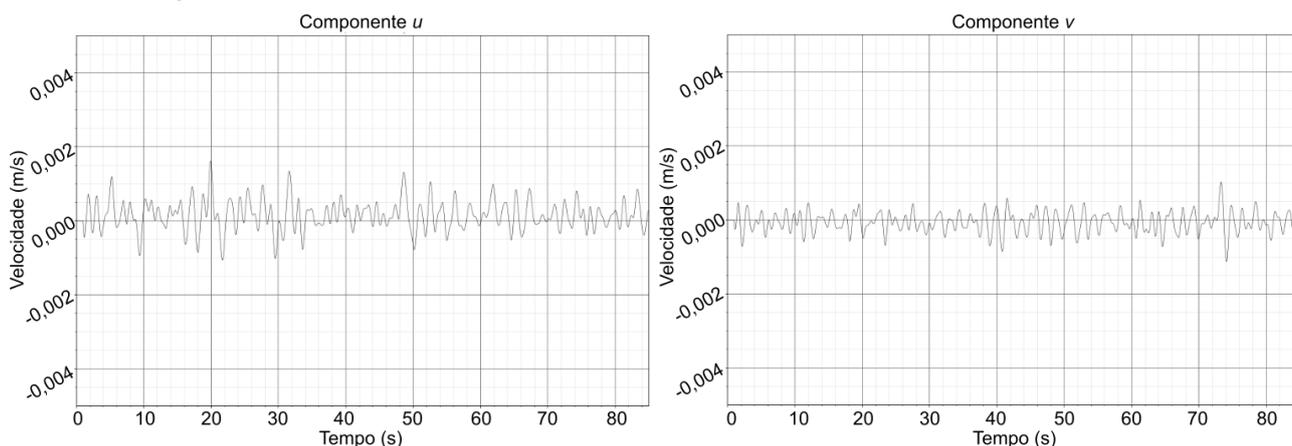


Figura 9 – Acelerômetro nº 6: velocidades calculadas nas componentes  $u$  e  $v$ .

Observa-se que nas velocidades calculadas para cada componente de cada acelerômetro a velocidade obtida apresenta um padrão de oscilação constante que se repete ao longo de todo o experimento, com valores ora negativos, ora positivos. Estes mesmos resultados foram observados com os outros acelerômetros.

No caso do acelerômetro nº 6 era esperado que a velocidade se mantivesse constante no valor de zero por não ter se movimentado durante o experimento. As oscilações observadas indicam que

não foi possível separar a aceleração correspondente ao campo gravitacional terrestre da aceleração do movimento em si com o procedimento proposto, o que resulta em inconsistências nos valores de velocidade obtidos.

A dificuldade de separar a gravidade da Terra da aceleração do escorregamento sugere que o movimento do solo ocorre num espectro de frequência próximo ao do campo gravitacional. Uma alternativa para o aprimoramento do procedimento de cálculo de velocidade é utilizar magnetômetros associados aos acelerômetros, pois eles permitem calcular o campo gravitacional terrestre em cada eixo. Todavia, seria necessário realizar uma manipulação matemática dos sinais obtidos que também pode incorrer em erros, além de implicar num maior custo do instrumento.

Nesta pesquisa utilizamos acelerômetros ditos de baixo custo que mesmo com suas características menos robustas permitiram identificar variações de aceleração em cada componente antes que evidências macroscópicas sugerissem o rompimento do talude. Essas variações de aceleração constituem por si só sinais que antecedem a ruptura e que podem ser explorados no futuro dentro de sistemas de alerta antecipado, sem a necessidade de cálculo da velocidade translacional, como se tentou realizar no caso apresentado neste artigo. Utilizar medidas de aceleração para fins de monitoramento geotécnico não é usual, portanto, constitui uma inovação a ser perseguida em pesquisas futuras.

## **CONCLUSÕES**

Os sistemas de monitoramento de estabilidade de encostas são tradicionalmente baseados nas medidas de deslocamento e velocidade. Neste trabalho, foram utilizados acelerômetros para monitoramento num ensaio de simulação em escala de laboratório e foi proposto um método para calcular a velocidade a partir da aceleração, visando sua utilização como proposto no método do “inverso da velocidade ao longo do tempo” (Fukuzuono, 1985). O método apresentado nesse artigo é uma evolução do tratamento de dados apresentado por D’Elia-Otero (2020) e, com a sua aplicação, concluímos que ambos são insatisfatórios para calcular velocidade a partir de aceleração devido à impossibilidade de separar o campo gravitacional terrestre da aceleração do movimento do solo.

Ainda assim, com os sensores de baixo custo utilizados foi possível identificar variações diretamente nos sinais obtidos indicativas da iminência de ruptura. De forma que os acelerômetros se revelaram sensores promissores para aplicação no monitoramento de encostas pois possibilitaram a aquisição de dados de interesse ao desenvolvimento do sistema de alerta e apresentam custo relativamente menor quando comparados a instrumentos usuais de monitoramento geotécnico.

Tradicionalmente em geotecnia utilizam-se medidas diretas de deslocamento para cálculo das velocidades do movimento. Para calcular a velocidade e o deslocamento a partir da aceleração seria necessário conjugar os acelerômetros a magnetômetros, o que encarece o sistema sem garantia de aprimoramento do resultado, devido à necessidade de manipulação matemática. Sugere-se, portanto, que em pesquisas futuras seja desenvolvido um procedimento de análise de dados e estabelecimento de níveis de alerta baseados diretamente nas leituras de acelerações, sem que haja a necessidade de se calcularem velocidades ou deslocamentos a partir dos dados coletados pelos acelerômetros.

## **AGRADECIMENTOS**

A pesquisa foi financiada com recursos da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP): processos 2017/50343-2, 2018/15869-6 e 2019/16458-2 e fez parte de um projeto maior, denominado “Plano de Desenvolvimento Institucional da Área de Transformação Digital: manufatura e cidades inteligentes e sustentáveis (PDIP)”, desenvolvido pelo instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) com financiamento da FAPESP (processo 2017/50343-2). Os autores agradecem aos laboratórios e aos centros tecnológicos do IPT envolvidos na pesquisa. Agradecem ainda à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de mestrado no âmbito do Programa de Pós-graduação em Geociências da UNICAMP, nos meses iniciais da pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- ASKARINEJAD, A. et al. (2018) "*Precursors of instability in a natural slope due to rainfall: a full-scale experiment*" in *Landslides*, v. 15, n. 9, p. 1745-1759.
- CARLA, T. et al. (2017) "*Guidelines on the use of inverse velocity method as a tool for setting alarm thresholds and forecasting landslides and structure collapses*" in *Landslides*, v. 14, n. 517-534.
- FUKUZUONO, T.A. (1985) "*A new method for predicting the failure time of a slope*" in *Proceedings of the Fourth International Conference and Field Workshop on Landslides*, p.145-150.
- GIRI, P. et al. (2018) "*Laboratory simulation to understand translational soil slides and establish movement criteria using wireless IMU sensors*" in *Landslides*, v. 15, n. 12, p. 2437-2447.
- D'ELIA-OTERO, M. (2020) "*Aplicação de sensores inerciais no monitoramento de taludes de solo sujeitos a escorregamentos*", Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 101p.
- OOI, G.L. et al. (2014) "*An instrumented flume to characterize the initiation features of flow landslides*" in *Geotechnical Testing Journal*, v. 37, n. 5, p. 1-21.