



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Instituto de Geociências

MALENA D'ELIA OTERO

APLICAÇÃO DE SENSORES INERCIAIS NO MONITORAMENTO DE TALUDES DE
SOLO SUJEITOS A ESCORREGAMENTOS

CAMPINAS

2020

MALENA D'ELIA OTERO

APLICAÇÃO DE SENSORES INERCIAIS NO MONITORAMENTO DE TALUDES DE
SOLO SUJEITOS A ESCORREGAMENTOS

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO INSTITUTO DE
GEOCIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE
CAMPINAS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRA
EM GEOCIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOLOGIA E
RECURSOS NATURAIS

ORIENTADORA: PROF^a. DR^a. ANA ELISA SILVA DE ABREU

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL
DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA
MALENA D'ELIA OTERO E ORIENTADA PELA PROFA.
DRA. ANA ELISA SILVA DE ABREU

CAMPINAS

2020

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca do Instituto de Geociências
Marta dos Santos - CRB 8/5892

D379a D'Elia Otero, Malena, 1988-
Aplicação de sensores inerciais no monitoramento de taludes de solo sujeitos a escorregamentos / Malena D'Elia Otero. – Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Ana Elisa Silva de Abreu.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

1. Detectores. 2. Desastres ambientais. 3. Monitoramento ambiental. 4. Riscos ambientais. 5. Redes de sensores sem fio. I. Abreu, Ana Elisa Silva de, 1973-. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Geociências. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Use of inertial sensors for monitoring prone to landslides soil slopes

Palavras-chave em inglês:

Detectors

Environmental disasters

Environmental monitoring

Environmental risks

Wireless Sensor Networks

Área de concentração: Geologia e Recursos Naturais

Titulação: Mestra em Geociências

Banca examinadora:

Ana Elisa Silva de Abreu [Orientador]

Eduardo Soares de Macedo

Jefferson de Lima Picanço

Data de defesa: 14-09-2020

Programa de Pós-Graduação: Geociências

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-6550-3130>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/0905678519780056>



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

AUTORA: Malena D'Elia Otero

**APLICAÇÃO DE SENSORES INERCIAIS NO MONITORAMENTO DE
TALUDES DE SOLO SUJEITOS A ESCORREGAMENTOS**

ORIENTADORA: Prof^a. Dr^a. Ana Elisa Silva de Abreu

Aprovado em: 14 / 09 / 2020

EXAMINADORES:

Prof^a. Dr^a. Ana Elisa Silva de Abreu - Presidente

Prof. Dr. Jefferson de Lima Picanço

Dr. Eduardo Soares de Macedo

***A Ata de Defesa assinada pelos membros da Comissão Examinadora consta
no processo de vida acadêmica da aluna.***

Campinas, 14 de setembro de 2020.

SÚMULA/BIOGRAFIA

Malena D'Elia Otero nasceu na cidade de Mar del Plata (Argentina). Aos 13 anos se mudou, junto com sua família, para São Paulo. Formou-se no curso de Geologia na Universidade de São Paulo (USP), em dezembro de 2011. Durante a graduação, foi bolsista de iniciação científica da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). Após formada, atuou na área de Geologia de Engenharia, principalmente com projetos de obras de infraestrutura no Estado de São Paulo. Fez especialização no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) em investigações do subsolo entre os anos de 2015 e 2017. Em março de 2018, ingressou no curso de Mestrado em Geociências da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), onde desenvolveu, em parceria com o IPT, pesquisa relacionada ao uso de sensores inerciais para monitoramento de encostas e prevenção de desastres. Realizou parte da pesquisa na Universidade Tecnológica de Delft (TU Delft), no período de outubro de 2019 a março de 2020. Foi bolsista de mestrado da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e da FAPESP. Ingressou no programa de Doutorado do Instituto de Geociências da UNICAMP em setembro de 2020.

DEDICATÓRIA

A mis viejos:

Archie y Mariana, Mariana y Archie

AGRADECIMENTOS

A realização desta pesquisa de mestrado não teria sido possível se não fosse pelo apoio de todos os que me acompanharam e aos quais eu sou infinitamente grata.

Agradeço a minha orientadora, Ana Elisa Silva de Abreu, pela parceria que existe desde antes até do mestrado. Pelo compartilhamento de seu conhecimento, pela paciência na orientação e pelo incentivo constante a ir um pouco além, sempre com muita gentileza, carinho e bondade.

Ao pessoal do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, com quem tive o enorme prazer de desenvolver esta pesquisa: Alessandra Cristina Corsi, Eduardo Soares Macedo e Marcela Penha Pereira Guimarães, por todas as trocas de conhecimento e discussões muito proveitosas. Ao Lucas Henrique Sandré, pelo suporte operacional na montagem de todos os experimentos. Aos colegas da Seção de Investigações, Riscos e Desastres Naturais pelo companheirismo e pela disposição para me auxiliar na pesquisa. Ao pessoal dos laboratórios: de Materiais e Construção Civil pelo fornecimento da areia e pelo apoio no preparo do solo de todos os ensaios de simulação; de Equipamentos Mecânicos e Estruturas e à Seção de Automação, Governança e Mobilidade Digital pelo empréstimo dos acelerômetros e apoio na realização dos ensaios. Aos técnicos do Departamento de Manutenção Predial e de Equipamentos pelo auxílio para preparar o ambiente de realização dos ensaios e pelos ajustes na caixa de simulação. A todos os envolvidos no “Plano de Desenvolvimento Institucional da Área de Transformação Digital: manufatura e cidades inteligentes e sustentáveis (PDIP)” pelas trocas de conhecimento.

Ao Laboratório de Mecânica dos Solos da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), em especial ao técnico Oscar dos Santos Neto pela ajuda nos ensaios de caracterização do solo. À Yara Franco, pela disponibilidade sempre para tirar minhas dúvidas e ao seu orientador, prof. Dr. Jefferson Lins da Silva, por nos receber em seu laboratório e nos apoiar com informações.

Ao Alysson Mazoni por todo o auxílio prestado com a etapa de programação em Python.

Ao professor Amin Askarinejad, da Universidade Tecnológica de Delft (TU Delft) pela orientação muito valiosa durante o estágio de pesquisa no exterior.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2018/15869-6.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Por fim, gostaria de agradecer àqueles que se bem não estiveram diretamente envolvidos na pesquisa, cumpriram um papel essencial para seu sucesso:

Aos meus pais, Archie D'Elia e Mariana Otero, que desde sempre me ensinaram o enorme valor do conhecimento, que me incentivam absolutamente todos os dias e que me apoiam em todas as decisões: *Gracias, totales!*

Ao meu irmão Guido D'Elia Otero, com sua infinita sabedoria para transitar nos “dramas diários da vida” e por ter sempre me incentivado a ter pensamento crítico, qualidade mais do que necessária para se fazer ciência e à Juliana Coelho, pela gentileza para revisar o texto.

Ao Renato Mariano, pelo companheirismo e pela parceria desde 2009. Pelo incentivo constante e por topar todas as aventuras que este mestrado envolveu.

Às amigas da vida: Cecília Marques, Júlia Prado e Luisa Yuba, que estão sempre disponíveis com seu carinho pro que der e vier. À Camila Augusto dos Santos, “minha irmã da pedra”, sempre presente não importa a distância que nos separa e que, além de tudo, me deu uma família durante o intercâmbio na Holanda. À Estefanía Rodríguez Golpe, *por el aguante* de já quase duas décadas, mesmo a um oceano de distância.

Às amigadas que ganhei durante a caminhada do mestrado: Dalva Patti Mafor, pela parceria, pelo apoio, pela leveza e pelas infinitas risadas e Ísis Sacramento, pela companhia e pelo acolhimento em Campinas. À Elisa e ao André Perpignan, minha família da Holanda, pela hospitalidade, pela amizade, pelo suporte que me deram durante o intercâmbio e pelo companheirismo muito agradável nos tempos de quarentena em Haia.

EPÍGRAFE

“Do not undertake a scientific career in quest of fame or money. There are easier and better ways to reach them. Undertake it only if nothing else will satisfy you; for nothing else is probably what you will receive. Your reward will be the widening of the horizon as you climb. And if you achieve that reward you will ask no other.”

(Cecilia Payne-Gaposchkin)

RESUMO

Os sistemas de alerta antecipado constituem uma medida não estrutural para a prevenção de desastres associados a escorregamentos, pois objetivam emitir alertas à população para que esta tenha tempo suficiente de adotar ações que reduzam perdas e danos. A utilização de nós sensores, através da implantação de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), como parte de um sistema de alerta antecipado para escorregamentos vem gradativamente aumentando, com resultados promissores. Nós sensores apresentam como vantagens monitoramento em tempo real e alta resolução. O sistema como um todo apresenta também altas capacidades de processamento e armazenamento de dados. Esta pesquisa testou em laboratório a capacidade de sensores inerciais de baixo custo, a saber: acelerômetros, de identificar sinais indicativos da iminência de ocorrência de escorregamentos. Foi utilizada uma caixa experimental para simulação de escorregamentos com dimensões de 160x50x50cm na qual foram realizados ensaios de simulação de escorregamentos em condições secas e molhadas, com vazão de água constante e variável. Utilizaram-se dois tipos de acelerômetros: ADXL 321, biaxial, com amplitude de $\pm 18g$ e configurado para frequência de aquisição de 400Hz (ensaio seco) e 4.000Hz (ensaios molhado), chamados na pesquisa de “Acelerômetros de Alta Frequência (AF)” e LIS331DHL, triaxial, com amplitude de $\pm 2g$ e configurado para frequência de aquisição de 1Hz, denominado no trabalho de “Acelerômetro de Baixa Frequência (BF)”. Foram desenvolvidos códigos em linguagem Python para análise dos dados no domínio do tempo e cálculo de velocidade a partir de dados de aceleração. Em condições secas, foi simulado um escorregamento translacional muito rápido e de pequenas dimensões e os AF identificaram a ruptura com 4 a 5 segundos de antecedência enquanto os BF não se movimentaram. Em condições molhadas, foram simulados escorregamentos rotacionais rápidos a muito rápidos e os AF e BF identificaram sinais prévios com até minutos de antecedência. Observou-se que os AF identificaram tais sinais antes que os BF, o que mostrou a importância de se trabalhar com elevadas frequências de aquisição. Nos ensaios molhados, também constatou-se uma possível relação entre o aumento de vazão de água no sistema e o incremento de aceleração medido. De modo geral, os resultados mostram que, além de medir sinais com antecedência, os acelerômetros permitem analisar qualitativamente a evolução do movimento e que acelerômetros triaxiais são vantajosos por enriquecer essa análise. As velocidades calculadas a partir da aceleração mostram padrão muito semelhante ao padrão da aceleração. Assim, propõe-se, no futuro, estabelecer protocolos de análise e estabelecimento de níveis de alerta baseados diretamente na aceleração, sem a necessidade de cálculo das velocidades a partir dos dados registrados pelos sensores.

Palavras-chave: Detectores; Desastres ambientais; Monitoramento ambiental; Riscos ambientais; Redes de sensores sem fio.

ABSTRACT

Early Warning Systems (EWS) are a non-structural measure for landslides disaster prevention: their main objective is to alert the population with enough time to take actions to prevent losses and damages. The use of sensor nodes, through the implementation of Wireless Sensor Networks (WSN), for monitoring of environmental disasters is gradually increasing and showing promising results. The main advantages of using sensor nodes are real-time monitoring and high resolution. The acquisition system has high data processing and storage capacities. This research tested in laboratory conditions the capacity of low-cost inertial sensors (accelerometers) to identify signals that may foresee the occurrence of landslides. An experimental tilting flume with 160cm length, 50 cm wide and 50cm height was used in landslide simulation experiments, in dry and wet conditions (with constant and variable water rate inflow). Two types of accelerometers with different characteristics were used: ADXL321, with two axes, $\pm 18g$ amplitude and configured to acquire data at 400Hz (dry experiments) and 4.000Hz (wet experiments), that is called in the research as “High Frequency accelerometer (HF)” and LIS331DHL, with three axes, $\pm 2g$ amplitude and configured to acquire data at 1Hz, which is called in this research as “Low Frequency accelerometer (LF)”. Python codes were developed to process acceleration data in time domain and to calculate velocity from acceleration data. In dry conditions, a very fast and small translational landslide was simulated. HF accelerometers identified the beginning of the rupture 4 to 5 seconds before macroscopic failure was observed whereas LF didn't move. In wet conditions, two fast to very fast rotational landslides were simulated and HF and LF accelerometers anticipated failure minutes before it macroscopically happened. HF accelerometers identified those signals before LF devices, showing that it is highly recommended to work with high frequency acquisition rates. In wet conditions, it was also noticed a possible relation between increasing water rate inflow and increasing acceleration measured. In general, results show that on top of measuring pre-failure signals, it is possible to analyze qualitatively landslide deflagration and evolution with accelerometers and that accelerometers with three axes enhance this analysis. Velocity patterns calculated from acceleration data are similar to acceleration patterns. Therefore, it is suggested in the future to develop analyzing procedures and alert levels based directly on acceleration, without the necessity of calculating velocities from accelerometers data.

Keywords: Detectors; Environmental disasters; Environmental monitoring; Environmental risks; Wireless Sensor Networks.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1: A) Escorregamento rotacional e B) escorregamento translacional.	27
Figura 3.2: Escorregamentos rotacionais em diferentes tipos de materiais. Fonte: Ahrendt (2005) adaptado de Varnes (1978).	27
Figura 3.3: Escorregamentos translacionais em diferentes tipos de materiais. Fonte: Ahrendt (2005) adaptado de Hutchinson (1988).	28
Figura 4.1: Caixa de simulação utilizada na pesquisa.	36
Figura 4.2: A) Acelerômetro de alta frequência – ADXL 321 e B) Acelerômetro de baixa frequência – LIS331DLH. Nestas fotos, ambos acelerômetros estão encapsulados.	38
Figura 4.3: Características físicas do solo utilizado. Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT 2019).	39
Figura 4.4: Ensaio seco: posicionamento do geotêxtil sobre 20cm de solo compactado. Sobre o geotêxtil, colocam-se mais 10cm de espessura de solo compactado.	41
Figura 4.5: Ensaio molhado: vista lateral do talude construído.	42
Figura 4.6: Ensaio molhado: vista de cima do talude construído.	42
Figura 4.7: Fluxograma de etapas necessárias para calcular a velocidade a partir da aceleração.	44
Figura 5.1: Curva de distribuição granulométrica do solo utilizado nos ensaios de simulação de escorregamentos.	45
Figura 5.2: Envoltória de ruptura obtida no ensaio de cisalhamento direto.	46
Figura 5.3: Ensaio 1 – seco: posicionamento dos acelerômetros no ensaio e das componentes de aceleração no espaço.	47
Figura 5.4: Ensaio 1 – seco: escorregamentos superficiais no terço superior, na inclinação de 37°.	48
Figura 5.5: Ensaio 1 – seco: ruptura macroscópica no contato entre o geotêxtil e o solo, aos 41°.	48
Figura 5.6: Ensaio 1 – seco, AF-1: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto. As letras A até H indicam os eventos de inclinação da caixa.	49

Figura 5.7: Ensaio 1 – seco, AF-2: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto. As letras A até H indicam os eventos de inclinação da caixa.....	50
Figura 5.8: Ensaio 1 – seco, AF-3: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto. As letras A até H indicam os eventos de inclinação da caixa.....	51
Figura 5.9: Ensaio 1 – seco, AF-2: aceleração medida nas componentes u e v , próximo ao instante da ruptura. Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto. As letras H e H' indicam o início e o fim do evento de inclinação da caixa respectivamente.....	52
Figura 5.10: Ensaio 1 – seco, AF-3: aceleração medida nas componentes u e v , próximo ao instante da ruptura. Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto. As letras H e H' indicam o início e o fim do evento de inclinação da caixa respectivamente.....	53
Figura 5.11: Ensaio 1 – seco: detalhe do escorregamento simulado e do posicionamento dos sensores após a ruptura macroscópica. Observa-se que o BF-1 se manteve no mesmo lugar enquanto os AF-2 e AF-3, se movimentaram junto com o solo.....	54
Figura 5.12: Ensaio 2 – molhado: posicionamento dos acelerômetros no ensaio e das componentes de aceleração no espaço.....	55
Figura 5.13: Ensaio 2 – molhado: linha do tempo dos eventos observados macroscopicamente durante o ensaio. Letras A e B indicam os eventos de aumento de vazão mostrados nas figuras subsequentes.....	56
Figura 5.14: Ensaio 2 – molhado, vista do terço intermediário da caixa. Desprendimento de bloco de solo localizado entre o terço inferior e o terço intermediário, aos 340s. A) Foto antes do desprendimento; B) foto após o desprendimento.....	56
Figura 5.15: Ensaio 2 – molhado, vista do terço intermediário da caixa. Desprendimento de bloco de solo localizado no terço intermediário, aos 2.340s. A) Foto antes do desprendimento; B) foto depois do desprendimento.....	57
Figura 5.16: Ensaio 2 – molhado, AF-1: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto. As letras A e B indicam os instantes em que foi realizado o aumento de vazão.....	59
Figura 5.17: Ensaio 2 – molhado, AF-2: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto. As letras A e B indicam os instantes	

em que foi realizado o aumento de vazão. Nota-se que o aumento de aceleração ocorre logo após o evento B de incremento de vazão.....	60
Figura 5.18: Ensaio 2 – molhado, AF-1: detalhe da aceleração medida nas componentes u e v próximo ao instante da ruptura macroscópica. Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto.	61
Figura 5.19: Ensaio 2 – molhado, AF-2: detalhe da aceleração medida nas componentes u e v próximo ao instante da ruptura macroscópica. Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto.	62
Figura 5.20: Ensaio 2 – molhado, AF-3: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto. As letras A e B indicam os instantes em que foi realizado o aumento de vazão. O aumento de aceleração ocorre logo após o evento A de incremento de vazão.	63
Figura 5.21: Ensaio 2 – molhado, AF-5: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto. As letras A e B indicam os instantes em que foi realizado o aumento de vazão. O aumento de aceleração ocorre logo após o evento A de incremento de vazão.	64
Figura 5.22: Ensaio 2 – molhado, AF-3: detalhe da aceleração medida nas componentes u e v próximo ao instante da ruptura macroscópica. Dados brutos em cinza e filtrado com média móvel, em preto.	65
Figura 5.23: Ensaio 2 – molhado, AF-5: detalhe da aceleração medida nas componentes u e v próximo ao instante da ruptura macroscópica. Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto.	66
Figura 5.24: Ensaio 2 – molhado, AF-4: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto. As letras A e B indicam os instantes em que foi realizado o aumento de vazão.	67
Figura 5.25: Ensaio 2 – molhado, AF-4: detalhe da aceleração medida nas componentes u e v próximo ao instante da ruptura macroscópica. Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto.	68
Figura 5.26: Ensaio 2 – molhado: sequência de eventos observados macroscopicamente e com os dados de aceleração. As letras A e B indicam os eventos de aumento de vazão.	69

Figura 5.27: Ensaio 2 – molhado, BF-1: aceleração medida nas componentes u , u' e v . Dados brutos.	71
Figura 5.28: Ensaio 3 – molhado: posicionamento dos acelerômetros no ensaio e das componentes de aceleração no espaço.....	72
Figura 5.29: Ensaio 3 – molhado: linha do tempo dos eventos observados macroscopicamente durante o ensaio.	73
Figura 5.30: Sequência de fotos com o desprendimento do bloco localizado no terço intermediário. A) Vista aos 40s, antes do início do desprendimento; B) vista aos 45s, no início do desprendimento; C) vista aos 65s, quando o movimento de desprendimento cessa.	73
Figura 5.31: Ensaio 3 – molhado, AF-1: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrado com média móvel, em preto.....	77
Figura 5.32: Ensaio 3 – molhado, AF-2: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrado com média móvel, em preto.....	78
Figura 5.33: Ensaio 3 – molhado, AF-5: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrado com média móvel, em preto.....	79
Figura 5.34: Ensaio 3 – molhado, AF-3: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrado com média móvel, em preto.....	80
Figura 5.35: Ensaio 3 – molhado, AF-4: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrado com média móvel, em preto.....	81
Figura 5.36: Ensaio 3 – molhado, BF-1: aceleração medida nas componentes u , u' e v . Dados brutos.	82
Figura 5.37: Ensaio 3 – molhado, BF-2: aceleração medida nas componentes u , u' e v . Dados brutos.	83
Figura 6.1: Ensaio 2 – molhado, AF-1: velocidades calculadas nas componentes u e v . As letras A e B indicam os instantes em que foi realizado o aumento de vazão.	86
Figura 6.2: Ensaio 2 – molhado, AF-2: velocidades calculadas nas componentes u e v . As letras A e B indicam os instantes em que foi realizado o aumento de vazão.	87
Figura 6.3: Ensaio 2 – molhado, AF-3: velocidades calculadas nas componentes u e v . A letra A indica o instante em que foi realizado o aumento de vazão.	88
Figura 6.4: Ensaio 2 – molhado, AF-4: velocidades calculadas nas componentes u e v	89

Figura 6.5: Ensaio 2 – molhado, AF-5: velocidades calculadas nas componentes u e v . A letra A indica o instante em que foi realizado o aumento de vazão.	90
Figura 6.6: Ensaio 3 – molhado, AF-1: velocidades calculadas nas componentes u e v	92
Figura 6.7: Ensaio 3 – molhado, AF-2: velocidades calculadas nas componentes u e v	93
Figura 6.8: Ensaio 3 – molhado, AF-3: velocidades calculadas nas componentes u e v	94
Figura 6.9: Ensaio 3 – molhado, AF-4: velocidades calculadas nas componentes u e v	95
Figura 6.10: Ensaio 3 – molhado, AF-5: velocidades calculadas nas componentes u e v	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Classificação de movimentos de massa proposta por Varnes (1978), conforme revisão de Hungr <i>et al.</i> (2014).....	25
Tabela 3.2: Complementação da classificação de Varnes de 1978, realizada pelo International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on Landslide Inventory – WP/WLI (1995) e por Cruden & Varnes (1996). Fonte: Hungr <i>et al.</i> , 2014.....	26
Tabela 3.3: Dimensões das caixas experimentais utilizadas em ensaios de simulação de movimentos de massa em escala de laboratório.....	28
Tabela 4.1: Características dos acelerômetros utilizados na pesquisa.....	37
Tabela 5.1: Parâmetros de caracterização do solo.....	45
Tabela 5.2: Ensaio 1 – seco: eventos de inclinação da caixa e observações macroscópicas realizadas.	47
Tabela 6.1: Ensaio 2 – molhado: velocidade máximas calculadas em cada componente de cada acelerômetro	85
Tabela 6.2: Ensaio 3 – molhado: velocidade máximas calculadas em cada componente de cada acelerômetro	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AF	Acelerômetro de Alta Frequência
BF	Acelerômetro de Baixa Frequência
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CC	Coeficiente de Curvatura
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais
CNU	Coeficiente de Não Uniformidade
EWS	<i>Early Warning System</i>
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
IAEG	<i>International Association of Engineering Geology</i>
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
NBR	Norma Brasileira de Referência
PDIP	Plano de Desenvolvimento Institucional da Área de Transformação Digital: manufatura e cidades inteligentes e sustentáveis
PPDC	Plano Preventivo de Defesa Civil do Estado de São Paulo
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio
UNISDR	<i>United Nations Office for Disaster Risk Reduction</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Networks</i>
WP/WLI	<i>International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on Landslide Inventory</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$e_{\text{mín}}$	Índice de vazios mínimo
$e_{\text{máx}}$	Índice de vazios máximo
$\rho_{\text{dmáx}}$	Massa específica seca máxima
$\rho_{\text{dmín}}$	Massa específica seca mínima
ρ_s	Massa específica dos sólidos
u	Componente de aceleração medida paralela ao sentido do movimento
u'	Componente de aceleração medida no mesmo plano de u e perpendicular a u
v	Componente de aceleração medida paralela ortogonalmente a u e u'

SUMÁRIO

1. Introdução	22
2. Objetivos.....	24
3. Fundamentação Teórica.....	25
3.1. Classificação de movimentos de massa	25
3.1.1. Escorregamentos e tipos de escorregamento	26
3.2. Simulação de movimentos de massa em ambiente de laboratório.....	28
3.3. Sistemas de alerta antecipado	29
3.4. Monitoramento de precursores de escorregamentos com nós sensores.....	30
3.4.1. Acelerômetros.....	31
4. Materiais e Métodos	36
4.1. Caixa de simulação de escorregamentos	36
4.2. Instrumentação: acelerômetros de alta frequência (AF) e de baixa frequência (BF)	37
4.3. Propriedades do solo utilizado nos ensaios.....	38
4.4. Procedimentos de preparo e realização dos ensaios de simulação	40
4.4.1. Ensaio 1 – seco	40
4.4.2. Ensaios 2 e 3 – molhados	41
4.5. Procedimento de análise dos dados captados pelos sensores e cálculo de velocidade	43
5. Resultados e discussão	45
5.1. Resultados dos Ensaios de Caracterização do solo utilizado	45
5.2. Resultados dos Ensaios de Simulação de Escorregamentos.....	46
5.2.1. Ensaio 1 – seco: observações macroscópicas	46
5.2.2. Ensaio 1 – seco: resultados dos acelerômetros AF.....	48
5.2.3. Ensaio 1 – seco: resultados dos acelerômetros BF	54
5.2.4. Ensaio 2 – molhado: observações macroscópicas	54

5.2.5. Ensaio 2 – molhado: resultados dos acelerômetros AF.....	57
5.2.6. Ensaio 2 – molhado: resultados do acelerômetro BF	70
5.2.7. Ensaio 3 – molhado: observações macroscópicas	72
5.2.8. Ensaio 3 – molhado: resultados dos acelerômetros AF.....	74
5.2.9. Ensaio 3 – molhado: resultados dos acelerômetros BF	75
6. Resultados dos Cálculos de Velocidade	84
6.1. Ensaio 2 – molhado.....	84
6.2. Ensaio 3 – molhado.....	91
7. Visão geral dos resultados	97
8. Conclusão	99
Referências	101

1. INTRODUÇÃO

O termo “risco” é definido como uma medida da probabilidade de ocorrer um efeito adverso à vida, saúde, propriedade ou ao ambiente e da severidade dos danos causados (Crozier & Glade 2005; Fell *et al.* 2005). Riscos geológicos, portanto, se constituem como a possibilidade ou probabilidade de ocorrer um processo ou fenômeno geológico que resulte em danos ou consequências sociais e/ou econômicas sobre um dado elemento, grupo ou comunidade. Os fenômenos geológicos que podem ocasionar riscos correspondem a fenômenos de dinâmica endógena ou exógena da Terra, como os escorregamentos.

Áreas de risco geológico correspondem, assim, a espaços geográficos ocupados pelo ser humano que podem ser atingidos por tais fenômenos ou processos naturais e/ou induzidos. Dentro do contexto das cidades brasileiras, normalmente, essas áreas correspondem a núcleos habitacionais de baixa renda (Brasil 2006).

Numa escala de tempo geológico, é certo que estes fenômenos ocorrerão em qualquer encosta. No entanto, a remoção da vegetação original e a ocupação urbana tendem a potencializar a ocorrência destes eventos, de forma a resultar em acidentes e desastres. Nas cidades brasileiras, a ocupação de encostas por assentamentos precários, favelas, vilas e loteamentos irregulares aumenta a frequência deste tipo de processo, em virtude da execução de cortes e aterros instáveis, deposição de lixo e ausência de sistemas de drenagem superficial e de esgoto (Brasil 2006).

De acordo com Brasil (2007), diversas são as alternativas de ações que podem ser adotadas para prevenção de riscos associados a escorregamentos, as quais podem ser agrupadas em medidas estruturais e não estruturais. As medidas estruturais se referem a medidas que fazem uso de soluções de engenharia, como obras de contenção e de drenagem, de infraestrutura urbana, relocação de moradias, entre outros. Trata-se de medidas, em geral, de custo elevado e alto impacto tanto na sociedade como no ambiente.

As medidas não estruturais são aquelas relacionadas a políticas urbanas, de planejamento urbano, legislação, planos de defesa civil e educação. De modo geral, são menos custosas e apresentam bons resultados, principalmente na prevenção de desastres. Dentre estas medidas, encontram-se os sistemas de alerta antecipado.

Os sistemas de alerta antecipado são constituídos por quatro elementos-chave que se inter-relacionam: 1) conhecimento do risco, 2) detecção, monitoramento, análise e predição da ocorrência de eventos perigosos e possíveis consequências, 3) disseminação e

comunicação de alertas e 4) preparo em todos os níveis para responder aos alertas emitidos (UNISDR 2019).

A presente pesquisa de mestrado se concentra na etapa de monitoramento baseado no uso de sensores. Em sistemas de alerta antecipado de escorregamentos, monitoram-se precursores que antecedem a deflagração do movimento, como precipitação, vibrações decorrentes de sismos, aceleração e velocidade de fenômenos pré-existentes e aumento rápido de poro-pressão no solo.

Esta pesquisa visou desenvolver conhecimentos científicos sobre novas tecnologias que podem ser utilizadas no monitoramento de encostas, especificamente para o monitoramento dos precursores associados ao deslocamento macroscópico de solo e, assim, contribuir para a incorporação destes sensores em sistemas de alerta para prevenção de acidentes e desastres associados a escorregamentos no Brasil e no mundo. Para tanto, foram realizados ensaios de simulação de escorregamentos em uma caixa experimental e o movimento deflagrado foi monitorado com acelerômetros, com o objetivo de identificar a existência de sinais prévios à ruptura.

A pesquisa teve financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (processos 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 e também financiado pela FAPESP (processo 2017/50343-2).

2. OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa foi analisar a aplicabilidade de sensores inerciais, a saber: acelerômetros, de baixo custo, dentro de um sistema de monitoramento de encostas.

Os objetivos específicos da pesquisa foram:

- verificar a capacidade de resposta dos sensores embutidos em solo em um ambiente de laboratório, com variáveis controladas;
- desenvolver em linguagem de programação rotinas de processamento dos sinais de aceleração, para filtragem de dados e cálculo de velocidade.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Classificação de movimentos de massa

Existem diversas classificações para os movimentos de massa, sendo que a classificação proposta por Varnes (1978) e revisada mais recentemente por Hungr *et al.* (2014), apresentada na Tabela 3.1, é utilizada amplamente na comunidade técnica e é adotada pela Associação Internacional de Geologia de Engenharia (*International Engineering Geology Association* – IAEG). O critério de classificação leva em consideração, em primeiro lugar, o tipo de movimento e, secundariamente, o material envolvido.

Tabela 3.1: Classificação de movimentos de massa proposta por Varnes (1978), conforme revisão de Hungr *et al.* (2014)

Tipo de movimento	Rocha	Solo
Quedas	Queda de rochas/gelo	Queda de blocos/detritos/silte
Tombamentos	Tombamento de blocos de rocha	Queda de cascalho, areia/silte
	Tombamento flexural de rocha	
Escorregamentos	Escorregamento de rocha rotacional	Escorregamento de argila/silte rotacional
	Escorregamento de rocha planar	Escorregamento de argila/silte planar
	Escorregamento de rocha em cunha	Escorregamento de cascalho/areia/detritos
	Escorregamento de rocha composto	Escorregamento de argila/silte composto
	Escorregamento de rocha irregular	
Espalhamentos	Espalhamento de encosta de rocha	Espalhamento por liquefação de areia/silte
		Espalhamento de argilas sensíveis
Fluxos	Avalanche de rocha/gelo	Fluxo seco de areia/silte/detritos
		Fluxo de areia/silte/detritos
		Fluxo de argila sensível
		Fluxo de detritos
		Fluxo de lama
		Corrida de detritos
		Avalanche de detritos
		Fluxo de terra
Deformação de encosta	Deformação de encosta montanhosa	Deformação de encosta de solo
	Deformação de encosta de rocha	Rastejo de solo
		Solifluxão

A classificação de Varnes (1978) foi posteriormente complementada com uma escala de velocidade e com os efeitos esperados e as medidas de resposta possíveis para cada classe de velocidade do movimento, apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Complementação da classificação de Varnes de 1978, realizada pelo International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on Landslide Inventory – WP/WLI (1995) e por Cruden & Varnes (1996).
Fonte: Hungr *et al.*, 2014.

Classe de velocidade	Descrição	Velocidade (mm/s)	Velocidade típica	Resposta
7	Extremamente rápido	5×10^3	5 m/s	-
6	Muito rápido	5×10^1	3 m/min	-
5	Rápido	5×10^{-1}	1,8 m/h	Evacuação
4	Moderado	5×10^{-3}	13 m/mês	Evacuação
3	Lento	5×10^{-5}	1,6 m/ano	Manutenção
2	Muito lento	5×10^{-7}	16 mm/ano	Manutenção
1	Extremamente lento			-

De acordo com *International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on Landslide Inventory* –WP/WLI (1995) e Cruden & Varnes (1996), para as classes 6 e 7, a velocidade do movimento é tão elevada que não é possível a evacuação das pessoas que habitam o local e também são esperados efeitos de destruição material. Para as classes 4 e 5, são esperadas perdas materiais, mas é possível adotar medidas de evacuação. No caso das classes 2 e 3, construções podem ser mantidas com ou sem necessidade de reparos. Por fim, a classe 1 corresponde a movimentos imperceptíveis sem instrumentos e, portanto, a construção pode ser realizada com os devidos cuidados.

3.1.1. Escorregamentos e tipos de escorregamento

Segundo Cruden & Varnes (1996), escorregamentos são definidos como movimentações descendentes de solo e/ou rocha ao longo de superfícies de ruptura. O movimento não ocorre de maneira simultânea em toda a superfície de ruptura; o volume de material deslocado aumenta progressivamente a partir de um ponto local de ruptura. Normalmente, o primeiro sinal macroscópico indicativo de movimentação é o aparecimento de trincas na superfície. A água é considerada um dos agentes mais importantes reguladores do processo e atua de diversas formas na instabilização de encostas (Filho & Faria 2018).

Os escorregamentos são subdivididos em “rotacionais ou circulares” e “translacionais ou planares” (Figura 3.1). A diferenciação entre o tipo de escorregamento é de significativa importância para a análise de estabilidade e a elaboração de medidas de controle (Varnes 1978).

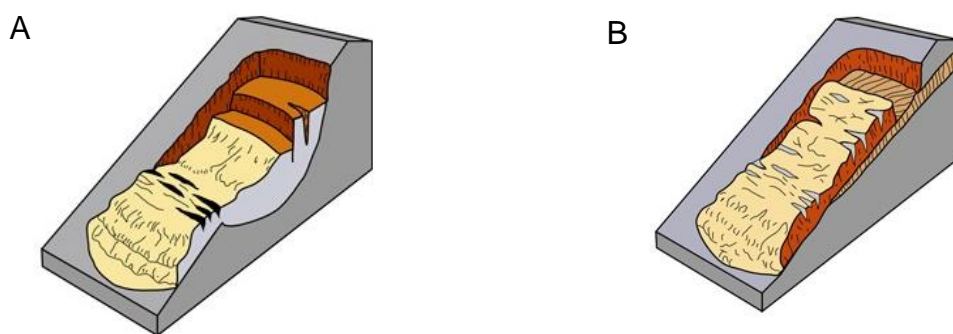


Figura 3.1: A) Escorregamento rotacional e B) escorregamento translacional.

Fonte: [Idaho Geological Survey \(2019\)](#).

Os escorregamentos rotacionais (Figura 3.2), também conhecidos como circulares, consistem na movimentação de material ao longo de uma superfície de ruptura curva, com concavidade voltada para cima. As trincas expostas na superfície são concêntricas e côncavas na direção do movimento e o material deslocado sofre pouca deformação (Varnes 1978).

De acordo com Cruden & Varnes (1996), ainda, a ocorrência deste tipo de movimento é elevada em aterros construídos, uma vez que são constituídos por materiais homogêneos. Materiais naturais são raramente uniformes, e os movimentos costumam acontecer preferencialmente ao longo de discontinuidades.

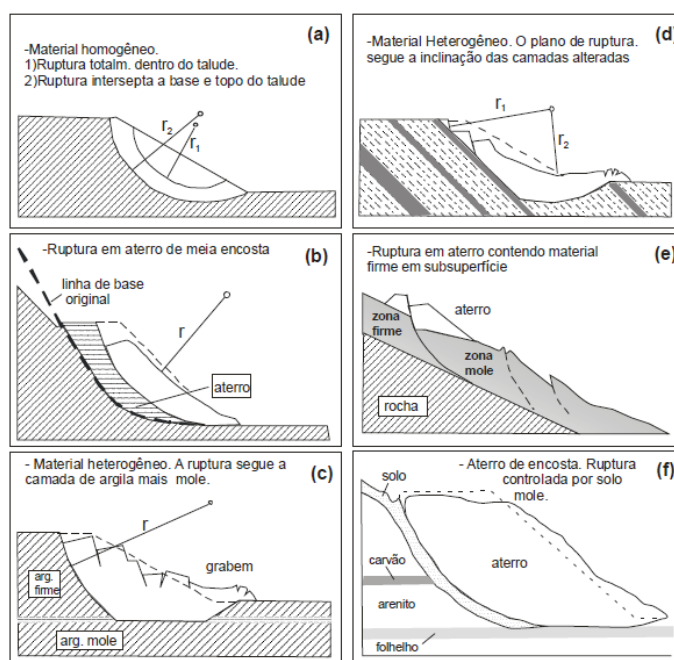


Figura 3.2: Escorregamentos rotacionais em diferentes tipos de materiais. Fonte: Ahrendt (2005) adaptado de Varnes (1978).

Nos escorregamentos translacionais, ou planares, a massa se movimenta ao longo de uma ou mais superfície de ruptura relativamente plana ou suavemente ondulada (Figura 3.3). Normalmente, o movimento é controlado pelas características estruturais do maciço, isto é, pela presença de superfícies de fraqueza, como falhas, fraturas, planos de acamamento, entre outros (Varnes 1978). Comparado com os escorregamentos rotacionais, os escorregamentos translacionais ocorrem em profundidades menores e dependendo das condições de umidade do solo e da velocidade desenvolvida, podem evoluir para outros tipos de movimento, como as corridas e os escoamentos (Cruden & Varnes 1996).

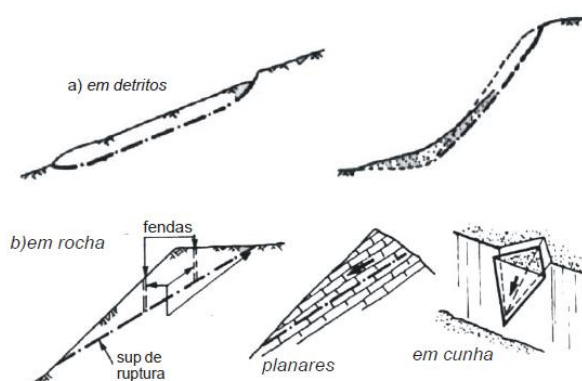


Figura 3.3: Escorregamentos translacionais em diferentes tipos de materiais. Fonte: Ahrendt (2005) adaptado de Hutchinson (1988).

3.2. Simulação de movimentos de massa em ambiente de laboratório

Diversos são os trabalhos que simulam movimentos de massa em escala reduzida e ambiente de laboratório. A Tabela 3.3 apresenta uma síntese das referências encontradas na literatura nacional e internacional a respeito de ensaios de simulação destes movimentos em laboratório, nas quais os autores utilizaram caixas experimentais para construção de encostas. Destacam-se as dimensões utilizadas e os tipos de movimentos simulados em cada caixa.

Tabela 3.3: Dimensões das caixas experimentais utilizadas em ensaios de simulação de movimentos de massa em escala de laboratório.

Referência	Dimensões (comprimento x largura x profundidade, em cm)	Tipo de movimento
Franco <i>et al.</i> (2019)	210 x 50 x 50	Escorregamento
Giri <i>et al.</i> (2018)	183 x 149 x 30	Escorregamento
Sasahara (2017)	300 x 150 x 50	Escorregamento
Chen <i>et al.</i> (2011)	157 x 60 x 67	Fluxo e escorregamento
Ooi <i>et al.</i> (2014)	280 x 80 x 60	Fluxo
Olivares & Damiano (2007)	220 x 60 x 40	Fluxo de massa
Lourenço <i>et al.</i> (2005)	300 x 30 x 45	Escorregamento
Avelar (2003)	178 x 60 x 35	Fluxo
Wang & Sassa (2003)	180 x 24 x 15	Escorregamento
Fukuzono (1985)	Rampa de 780 cm de comprimento	Não diferenciados

3.3. Sistemas de alerta antecipado

Um sistema de alerta antecipado (do inglês *early warning system*) é definido, de acordo com o UNISDR, como “um sistema que integra sistemas de monitoramento, previsão e predição de perigos, de gerenciamento de risco de desastres, de comunicação e de planejamento de atividades de resposta com procedimentos que permitem indivíduos, comunidades, governos, negócios e outros adotar ações com antecedência suficiente, de forma a reduzir riscos de desastres antecipadamente em eventos de perigo” (UNISDR 2019).

Os sistemas de alerta cada vez adquirem mais importância devido a se constituírem como um dos pilares na prevenção de desastres, principalmente quando não é possível aplicar medidas mitigatórias para evitar a deflagração de processos ou para que elementos vulneráveis não sejam atingidos por massas rompidas (Arnhardt *et al.* 2007; Corominas *et al.* 2005).

O objetivo principal de um sistema de alerta é estimar o instante no qual acontecerá a ruptura para, assim, colocar em prática ações antecipadamente. Um melhor entendimento dos mecanismos de deflagração, aliado à detecção antecipada de movimentos do solo e a uma estratégia de evacuação eficiente são cruciais para a mitigação dos desastres (Askarinejad *et al.* 2018). Segundo Vassallo *et al.* (2015), a avaliação dos mecanismos de deflagração, especificamente no que diz respeito a relação entre infiltração de água e deslocamentos do maciço, pode ser realizada por aproximação física ou fenomenológica.

Numa aproximação física, busca-se reproduzir os processos físicos relacionados à variação de pressão neutra no solo e/ou taxas de deslocamento enquanto na aproximação fenomenológica, estabelecem-se relações de correlação empíricas entre deslocamentos e seus fatores deflagradores ou relações estatísticas entre a água subterrânea medida e taxas de precipitação e ocorrência de eventos de escorregamentos.

Esta última aproximação, fundamenta os sistemas de alerta dentro do contexto brasileiro. Destaca-se o Plano Preventivo de Defesa Civil do Estado de São Paulo (PPDC) como pioneiro dos sistemas de alerta em território nacional, o qual se baseia na previsão da ocorrência de escorregamentos em função do índice pluviométrico, previsão meteorológica e vistorias de campo (Macedo & Mirandola 2018). Outros exemplos brasileiros baseados no índice pluviométrico são o Alerta-Rio, no Rio de Janeiro (Calvello *et al.* 2015) e a rede de monitoramento implantada pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), a qual abrange 958 municípios (CEMADEN 2018).

3.4. Monitoramento de precursores de escorregamentos com nós sensores

De acordo com Stähli *et al.* (2015), um dos quatro elementos-chave de um sistema de alerta é o monitoramento baseado no uso de sensores e estabelecimento de níveis de alerta. Segundo os autores, existem alguns desafios a serem superados nos sistemas de monitoramento, como a necessidade de se obter informações de alta resolução em tempo real e com acurácia e de se desenvolverem sistemas técnicos que meçam sinais precursores de deflagração do movimento com custos acessíveis.

Dentro da problemática de se obter informações de alta resolução, Yin *et al.* (2010) apontam que um sistema de monitoramento em tempo real e com informações de alta resolução inclui instrumentos de monitoramento automático, métodos rápidos e altamente eficientes de transmissão de dados, processamento e armazenamento automático das informações coletadas e distribuição dessa informação.

A necessidade de fazer uso remotamente de instrumentos automatizados de alta resolução é também justificada por motivos de segurança, uma vez que os sinais precursores podem ser identificados pouco tempo antes da ruptura e as movimentações ocorrem em velocidades elevadas (Askarinejad & Springman 2018).

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) consistem em nós sensores que coletam parâmetros relevantes e transmitem esta informação a pontos de coleta para processamento posterior. Nós sensores são dispositivos computacionais com capacidade de sensoriamento, processamento e comunicação dos sinais medidos (Ruiz 2003). De modo geral, estas tecnologias têm capacidade para capturar, processar e transmitir dados em tempo real e com alta resolução (Ramesh 2009). De acordo com Arnhardt *et al.* (2007) e Li *et al.* (2016) as RSSF vêm sendo progressivamente introduzidas em muitas áreas, inclusive a de monitoramento de desastres.

As RSSF podem integrar sensores simples de umidade e temperatura com sensores de alta precisão de deslocamento e aceleração, inclinação, sensores geofísicos e acústicos e até módulos de posicionamento geográfico (Arnhardt *et al.* 2007).

No tocante ao monitoramento ambiental para prevenção de desastres, os nós sensores devem fornecer informações a respeito de condicionantes que podem deflagrar movimentos de massa, como saturação e umidade do solo, e de sinais que antecedem e que caracterizam o movimento, isto é, deslocamento e aceleração das massas rompidas.

Petley *et al.* (2002), Petley (2004) e Federico *et al.* (2012) defendem, ainda, que é de suma importância compreender os processos de deflagração e propagação envolvidos na ruptura de uma encosta, pois o entendimento destes processos permite estabelecer modelos de predição de ruptura. 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 a partir dos dados de deslocamento medidos *in situ*, ao longo do tempo. O tempo de ruptura ocorre quando o valor do inverso da velocidade tende a zero.

Segundo Carla *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.

3.4.1. Acelerômetros

Os acelerômetros são dispositivos inerciais utilizados para medir a aceleração em um até três eixos ortogonais, ao se submeter um objeto a forças externas, incluindo a gravidade. Devem, portanto, responder a várias formas de aceleração: de movimentos constantes e lentos a impactos e vibrações fortes. Basicamente, consistem em um sistema no qual uma pequena massa de prova (m) é implantada na superfície do circuito e suspensa por pequenas vigas flexíveis. Esta massa m , ainda, está conectada a um amortecedor e um sensor de deslocamento. O amortecedor reduz o movimento da massa enquanto o sensor de deslocamento determina a posição da massa com relação ao seu zero (Fraden 2016). Segundo

Li *et al.* (2016), internamente, os acelerômetros convertem, então, essa deformação em um sinal voltagem, o qual é subsequentemente transformado num valor digital, a partir do qual a aceleração ao longo de um eixo é calculada. Embora a unidade do padrão internacional de medidas para aceleração seja “ m/s^2 ”, é muito frequente a aceleração ser apresentada em termos de “ g ”, que corresponde à aceleração devida à gravidade na superfície da Terra ($1g$ é igual a $9,8 \text{ m/s}^2$, aproximadamente).

Existem diversos tipos de acelerômetro: capacitivos, piezoelétricos, piezoresistivos, entre outros, conforme apresentado por Fraden (2016) e são caracterizados em função de:

- largura de banda (B_w), em Hz: faixa de frequências de trabalho. Depende da massa m , da rigidez do material e do fator de amortecimento;
- sensibilidade mecânica (S_m), em $\text{m}/(\text{m/s}^2)$: deslocamento da massa m em função da aceleração;
- sensibilidade elétrica (S), em mV/g : corresponde à saída elétrica em função da aceleração;
- amplitude, em g : aceleração máxima e mínima que pode ser medida;
- fundo de escala (a_{max}): máxima aceleração que pode ser medida corretamente,
- fator de amortecimento;
- massa inercial (m), em g ou mg : massa do acelerômetro em si.

Os acelerômetros se destacam como dispositivos promissores na detecção de sinais que antecedem escorregamentos e estudos anteriores, como os de Arnhardt *et al.* (2007), Azzam *et al.* (2010), Segalini & Carini (2013), Ooi *et al.* (2014), Giri *et al.* (2018) e Leão & Souza (2018), mostram que os mesmos podem ser utilizados como nós sensores para o monitoramento de estabilidade de encostas e detecção de sinais antecedentes à ruptura.

Arnhardt *et al.* (2007) e Azzam *et al.* (2010) elaboraram um protótipo de sistema de monitoramento de movimentos de massa em rocha (quedas, tombamento e escorregamentos de rocha) com sensores de baixo custo autônomos. O sistema foi constituído com acelerômetros, inclinômetros e sensores barométricos. Os autores ressaltam a importância de se combinar diferentes tipos de sensores para realizar a verificação cruzada entre os dispositivos, avaliar individualmente cada um e, assim, aprimorar a qualidade dos dados e diminuir os falsos alarmes.

Segalini & Carini (2013) desenvolveram em laboratório um dispositivo com acelerômetros para controle de inclinação, semelhante a um inclinômetro. O dispositivo consiste em uma haste na qual são acoplados, em distâncias equiespaçadas, os acelerômetros triaxiais. A partir da variação da inclinação medida com o acelerômetro é calculado o deslocamento horizontal. O dispositivo foi testado com sucesso em laboratório.

Ooi *et al.* (2014) testaram em ambiente de laboratório o uso de acelerômetros combinados com giroscópios para identificação de sinais de ocorrência de escorregamentos em um solo predominantemente arenoso. No estudo, foram utilizados acelerômetros de três eixos. De acordo com Ooi *et al.* (2014), a escolha destes dispositivos se baseou no baixo custo e dimensões reduzidas.

Os autores apresentam o procedimento de calibração do acelerômetro antes da utilização nos experimentos de simulação de escorregamentos. Os experimentos de simulação foram realizados em inclinação fixa de 30° e com fluxo constante de água, de modo que o solo fosse paulatinamente saturado, de maneira ascendente (da base para o topo), com os acelerômetros enterrados em profundidade.

Os resultados mostraram que decorridos aproximadamente oito minutos desde o início do fornecimento de água, inicia-se a movimentação, identificada com os dados dos acelerômetros como uma rotação. Após 53,31s, a rotação cessa e o escorregamento prossegue predominantemente como translacional. A desintegração total da massa do solo ocorre após 43,72s. Do primeiro sinal detectado até o rompimento total da massa, o tempo decorrido foi de 97,03s. Os sensores foram utilizados primordialmente para qualificar o tipo de movimento simulado.

Giri *et al.* (2018) estudaram também em condições de laboratório o uso de acelerômetros para identificação e caracterização de escorregamentos translacionais. Foram realizados ensaios de simulação de escorregamento em uma caixa de experimentos e em duas configurações de perfil de solo: solo arenoso (areia mal graduada) coberto por solo argiloso e solo homogêneo arenoso (areia mal graduada), com espessura de solo variando entre 20 e 25cm.

Os sensores utilizados nessa pesquisa consistem em um dispositivo que reúne acelerômetro de três eixos e giroscópio de três eixos e foram posicionados na superfície da encosta construída. Os experimentos de simulação de escorregamento foram realizados

mantendo inclinação fixa de 35° e fornecimento constante de água. Além dos sensores, o experimento foi também filmado.

No experimento realizado com solo arenoso e argiloso, as câmeras identificaram o início da movimentação após 291,6 min do início do mesmo, quando ocorreu a saturação total do solo. Os sensores detectaram a movimentação após 291,7 min, e os dados coletados indicaram rotação desprezível do solo, caracterizando o movimento, então, como um escorregamento translacional. Já, no caso do experimento realizado somente com solo arenoso, o movimento começou aos 13,0 min do início do experimento. Os sensores detectaram a movimentação aos 12,999 min, portanto, milésimos de segundos antes que fosse observada macroscopicamente no vídeo. Embora nos experimentos os sensores não tenham detectado a movimentação antes do que observado macroscopicamente, os resultados foram considerados satisfatórios, pois mostram o potencial do uso destes dispositivos para caracterizar os movimentos de massa e, portanto, são semelhantes aos resultados obtidos por Ooi *et al.* (2014).

Leão & Souza (2018) implantaram um sistema piloto de monitoramento de movimentos de solo, utilizando acelerômetros eletrônicos, em uma encosta real, no Morro da Cruz, em Itajaí (SC). O sistema consiste em uma haste à qual foram acoplados dois acelerômetros triaxiais, os quais se comunicavam com um *datalogger* através de fios. A haste retangular de alumínio, que apresenta dimensões de 50,8 x 25,4mm, foi enterrada no solo, a cerca de 1,0m de profundidade. Foram instaladas duas hastes numa região onde já haviam sido constatadas movimentações do solo: uma das hastes foi instalada na região basal e a outra, na região intermediária da encosta.

Os autores correlacionaram as acelerações medidas com dados de chuva e constataram que nos eventos de maior índice pluviométrico, as vibrações medidas são mais intensas durante e ao final da chuva, quando comparadas com os dias sem chuva. O estudo sugere que os acelerômetros apresentam boas condições para monitorar os movimentos de massa nos maciços de solo.

No tocante ao tratamento dos dados coletados por acelerômetros e outros nós sensores, devem ser realizadas etapas de processamento até chegar ao usuário para tomada de decisão. Li (2015) apresenta de maneira detalhada todos os procedimentos adotados nesta fase para RSSF aplicadas a casos de subsidência e de escorregamento. O objetivo final do processamento de dados é transformar os dados brutos obtidos em campo em dados que representem fisicamente o parâmetro medido.

De acordo com Li (2015), o processamento de dados inclui etapas de filtragem dos dados brutos para eliminação de dados decorrentes de erros de medição e etapas de refinamento, que incluem suavizar o sinal original, isto é, filtrar ruídos, para em seguida, realizar as estimativas físicas do parâmetro medido. Estes ruídos são inerentes ao próprio ambiente de instalação dos sensores e podem ser suavizados aplicando-se filtros, conforme Li (2015), Li *et al.* (2016) e Sheth & Thekkath (2007).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Caixa de simulação de escorregamentos

A caixa de ensaios de simulação de escorregamentos utilizada nesta pesquisa (Figura 4.1) apresenta dimensões de 160cm de comprimento, 50cm de largura e 50cm de profundidade. Esta caixa foi fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Foi confeccionada em chapa metálica com uma lateral de vidro para permitir a observação dos escorregamentos simulados. Na outra parede, foram executados furos, através dos quais é possível passar a fiação da instrumentação e vedá-los com passa-cabos. Nas extremidades, as chapas metálicas são removíveis. Equipou-se a caixa com um macaco hidráulico de 5t, que permite a sua inclinação gradual até o máximo de 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 da caixa. Na parte externa da caixa foram montados suportes metálicos removíveis para instalação de uma câmera fotográfica marca Canon, modelo EOS Rebel T3i, com 18Mpx de resolução e na máxima taxa de aquisição automática de imagens de 1 *frame* a cada 5 segundos para aquisição de fotos durante o ensaio. O suporte pode ser instalado no terço intermediário e no terço superior da caixa.

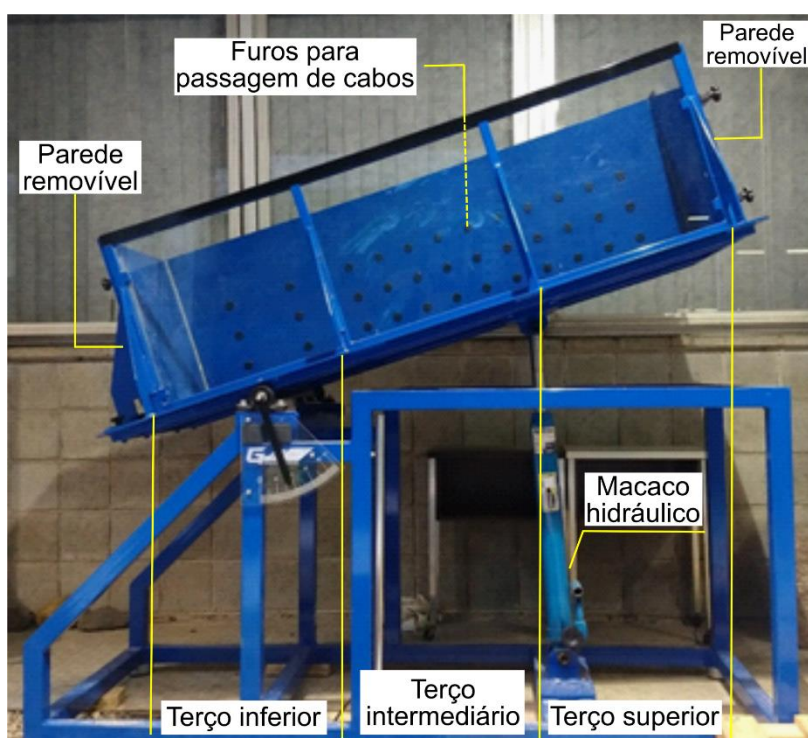


Figura 4.1: Caixa de simulação utilizada na pesquisa.

4.2. Instrumentação: acelerômetros de alta frequência (AF) e de baixa frequência (BF)

Foram utilizados dois tipos de acelerômetros, cujas características são apresentadas na Tabela 4.1. O uso de acelerômetros com características diferentes teve como objetivo verificar a capacidade destes dispositivos de detectarem movimentações que ocorrem na massa de solo previamente e durante as rupturas e, com estes resultados, especificar com maior clareza as características dos acelerômetros a serem utilizados no monitoramento de escorregamentos em escala real.

Tabela 4.1: Características dos acelerômetros utilizados na pesquisa

Modelo	Quantidade de eixos de medida	Amplitude (g)	Frequência de amostragem (Hz)	Quantidade de sensores
Analog Devices – ADXL 321 “Alta Frequência” (AF)	2 (u e v)	+/- 18	400 (seco) 4000 (molhado)	6
ST – LIS331DLH “Baixa Frequência” (BF)	3 (u , u' e v)	+/- 2	1	2

As frequências de amostragem apresentadas na Tabela 4.1 correspondem às frequências de aquisição do sistema de cada sensor como um todo (sensor e *datalogger*). Os acelerômetros ADXL 321 serão denominados ao longo deste trabalho como “acelerômetro de alta frequência” (AF), e os LIS331DLH, como “acelerômetro de baixa frequência” (BF) (Figura 4.2), mas destaca-se que ambos os sistemas 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 acelerômetros AF são biaxiais e seus eixos são denominados neste trabalho como u (paralelo ao sentido do movimento) e v (ortogonal a u). Os acelerômetros BF, por sua vez, são triaxiais e seus eixos são denominados u (paralelo ao sentido do movimento), u' (perpendicular a u , no mesmo plano) e v (ortogonal a u e u').

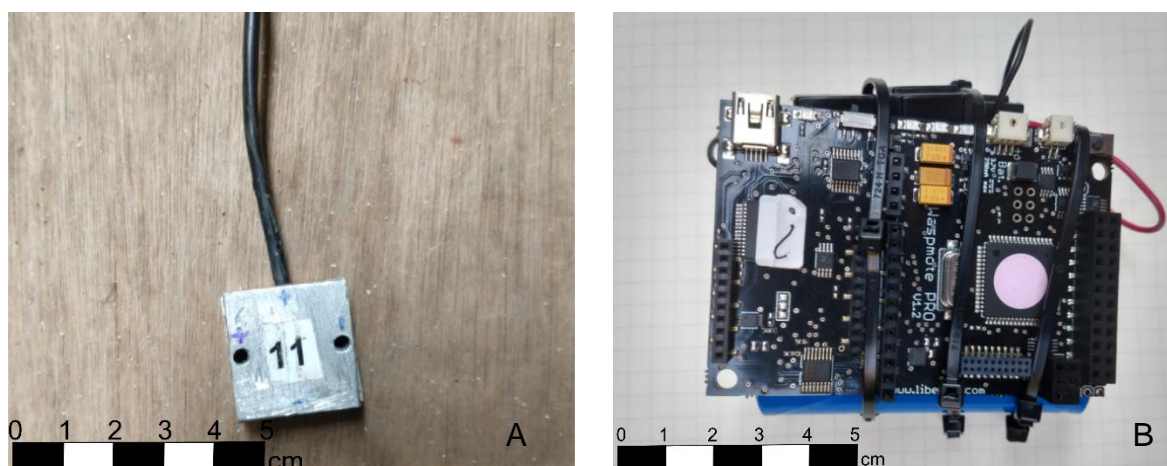


Figura 4.2: A) Acelerômetro de alta frequência – ADXL 321 e B) Acelerômetro de baixa frequência – LIS331DLH. Nestas fotos, ambos acelerômetros estão encapsulados.

Além das diferenças indicadas na Tabela 4.1, os sensores também diferem no mecanismo de transmissão dos dados coletados: os de alta frequência transmitem os dados através de cabo conectado a um *datalogger*, que, por sua vez, é conectado a um computador. Já os dispositivos de baixa frequência, possuem um cartão de memória embutido que coleta os dados e a transmissão é via *wireless*.

4.3. Propriedades do solo utilizado nos ensaios

O solo utilizado nos ensaios de simulação de escorregamentos é uma mistura em proporções iguais de areia normal IPT 50 *mesh* e 100 *mesh*, que correspondem ao material retido nas peneiras de 0,3 mm e 0,15 mm respectivamente. Ambas as frações têm teor de sílica de 96,1%. Decidiu-se trabalhar com uma mistura de frações granulométricas para ter um solo arenoso, porém não muito drenante e, assim, possibilitar a saturação com menores volumes de água nos ensaios molhados. A Figura 4.3 apresenta as características físicas do solo utilizado, fornecidas pelo Centro de Tecnologia de Obras de Infraestrutura – Laboratório de Materiais de Construção Civil, do IPT.

CERTIFICADO DE MATERIAL DE REFERÊNCIA N° 2253-103

LOTE 8 / 2019

AREIA NORMAL PARA ENSAIO DE CIMENTO- ESPECIFICAÇÃO (ABNT NBR 7214:2015)

Tabela 1 - Resultados de requisitos físicos e químicos - ABNT NBR 7214:2015

Determinação	Resultados	Requisito
Teor de sílica - ABNT NBR 14656:2001	96,1	≥ 95%, em massa
Granulometria ABNT NBR NM 248:2003	Tabela 2	
Umidade - ABNT NBR 7214:2015	0,0	≤ 0,2%, em massa
Matéria orgânica - ABNT NBR NM 49:2001	< 100 ppm	≤ 100 ppm

Tabela 2 - Granulometria

Fração	Material retido entre as peneiras de abertura nominal	Porcentagem em massa %	
		Resultados	Requisito
16	2,4 mm e 2,0 mm	6	≤ 10
	2,0 mm e 1,2 mm	91	≥ 90
30	1,2 mm e 0,6 mm	97	≥ 95
50	0,6 mm e 0,3 mm	97	≥ 95
100	0,3 mm e 0,15 mm	96	≥ 95

São Paulo, 26 de fevereiro de 2019

RESPONSÁVEIS TÉCNICOS

Tecg. Constr. Civ. Me. Osmar Hamilton
Becere

Supervisor de Ensaios

CREA nº 5060985826 - RE nº 8738.7

Quím. Me. Fabiano Ferreira Chotoli

Chefe do Laboratório

CRQ nº 04243178 - RE nº 8488.9

O original deste Certificado de Material de Referência, impresso em papel com a marca d'água IPT e devidamente assinado, é o único documento admitido como juridicamente válido pelo IPT.

Av. Prof. Almeida Prado, 532 | Cidade Universitária
São Paulo | SP | CEP 05508-901
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

www.ipt.br

Figura 4.3: Características físicas do solo utilizado.
Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT 2019).

Para a caracterização do solo utilizado, foram realizados os seguintes ensaios de acordo com as respectivas normas técnicas brasileiras (NBR):

- Análise granulométrica: NBR 7181 (Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT 2016b).
- Determinação de massa específica dos sólidos: NBR 6457 (ABNT 2016a).
- Determinação de índices de vazios máximo e mínimo: NBR 12004 (ABNT 1990).
- Cisalhamento direto: ensaio realizado com equipamento de ensaio de seção quadrada com 10,14 cm de lado e 2,0 cm de altura, amostra compactada na mesma massa específica utilizada pra preenchimento da caixa de simulação de escorregamentos, ensaio realizado em condições secas, com tensões normais de 10, 20, 40, 80 e 100kPa e velocidade de ensaio de 6 mm/min.

4.4. Procedimentos de preparo e realização dos ensaios de simulação

Foram realizados um ensaio em condições secas (Ensaio 1) e dois em condições molhadas (Ensaio 2 e 3). Previamente a estes ensaios foram realizadas diversas outras simulações, para testar o arranjo experimental e acertar detalhes do procedimento de execução dos ensaios. Neste item, são apresentados os procedimentos seguidos para a montagem de cada um destes três experimentos finais.

4.4.1. Ensaio 1 – seco

Na posição horizontal, a caixa foi preenchida com 30cm de espessura total de solo. O solo foi depositado em camadas de 5cm, as quais foram compactadas manualmente, com um soquete de madeira, na máxima densidade do solo. A instalação dos acelerômetros ocorreu durante a colocação das camadas de solo. Após a sua compactação, abria-se localmente uma pequena cava, instalava-se o acelerômetro e procedia-se ao reaterro compactado com soquete de madeira.

Aos 10cm de profundidade, foi posicionado o geotêxtil (de dimensões 160cm x 50cm), modelo “Basetrac Woven 25”, desenvolvido e fornecido pela empresa Huesker (Figura 4.4). O objetivo do uso deste geotêxtil foi induzir o desenvolvimento de uma superfície de ruptura no contato do solo com o geotêxtil, além de reforçar as camadas mais superficiais do solo e diminuir a ocorrência de fluxos superficiais de areia.

Após a instalação do geotêxtil, foram colocados mais 10cm de solo, atingindo a espessura total de 30cm de solo. Na condição seca, o escorregamento foi deflagrado através da inclinação gradual da caixa, até ocorrer a ruptura.



Figura 4.4: Ensaio seco: posicionamento do geotêxtil sobre 20cm de solo compactado. Sobre o geotêxtil, colocam-se mais 10cm de espessura de solo compactado.

A posição de instalação de cada acelerômetro dentro da caixa e o procedimento de levantamento da caixa são apresentados com maior detalhe no capítulo 5 para facilitar a comunicação e a discussão dos resultados.

4.4.2. Ensaios 2 e 3 – molhados

Nos ensaios molhados, instalou-se uma mangueira perfurada na base da caixa para permitir a saturação ascendente do solo. A mangueira foi coberta com um geotêxtil de 160cm x 50cm para melhorar o espalhamento da água na base do solo e evitar o carreamento de partículas. O procedimento de preenchimento da caixa e instalação dos acelerômetros foi semelhante ao do ensaio seco.

Nestes ensaios, não foi instalado o geotêxtil a 10cm de profundidade, pois com o solo úmido não ocorriam os fluxos superficiais conforme se inclinava a caixa de ensaios. Nestes ensaios, foram simulados escorregamentos rotacionais.

Após o preenchimento total da caixa, com 30cm de espessura de solo e na posição horizontal, foi realizada a saturação parcial do solo para permitir a escavação de um talude no terço inferior da caixa (Figura 4.5 e Figura 4.6). O objetivo da construção do talude é facilitar a deflagração dos escorregamentos. A escavação aconteceu sempre com o fornecimento de água desligado, após umedecimento do solo.

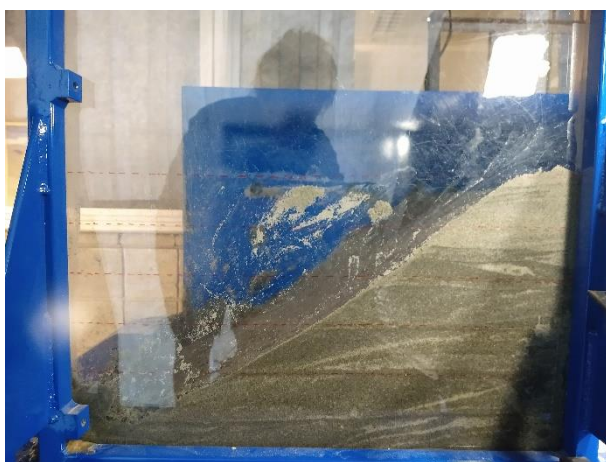


Figura 4.5: Ensaio molhado: vista lateral do talude construído.



Figura 4.6: Ensaio molhado: vista de cima do talude construído.

Finalizado o processo de construção do talude, a parede lateral do terço inferior foi removida, de forma a permitir que no escorregamento o solo se movimentasse livremente. Com o fornecimento de água desligado, a caixa foi inclinada até 30°. Os ensaios foram iniciados nesta inclinação, com o fornecimento de água ligado, até ocorrer a ruptura total do solo.

Os ensaios molhados diferiram entre si na forma como foram executados. No Ensaio 2, houve um tempo maior de repouso entre a saturação do solo para escavação do talude e a posterior inclinação da caixa do que no Ensaio 3, no qual não houve essa pausa. A pausa realizada no Ensaio 2 permitiu que o solo fosse drenado natural e parcialmente. Portanto, o Ensaio 2 se iniciou em uma condição de saturação diferente (menor) que a do Ensaio 3. Esta diferença na condição inicial de saturação dos dois ensaios fez com que no Ensaio 2 a movimentação do solo acontecesse de forma mais lenta que no Ensaio 3. Portanto, a duração de cada ensaio é diferente.

A posição de instalação de cada acelerômetro dentro da caixa em cada um destes ensaios é apresentada com maior detalhe no capítulo 5 para facilitar a comunicação e a discussão dos resultados.

4.5. Procedimento de análise dos dados captados pelos sensores e cálculo de velocidade

Após o preenchimento da caixa com solo e a instalação de todos os acelerômetros, os acelerômetros foram calibrados para estabelecer uma referência do início do ensaio.

Os dados de aceleração foram analisados no domínio do tempo. Para os dados coletados com os acelerômetros de alta frequência (AF), foi elaborado um procedimento de processamento dos sinais, devido ao grande volume de dados coletados.

Para o processamento dos sinais de aceleração foram desenvolvidos dois códigos em linguagem Python no domínio do tempo: um para filtrar os dados e outro para calcular as velocidades a partir dos dados de aceleração. Nesta pesquisa, foram calculadas apenas as velocidades com os dados de aceleração dos acelerômetros de alta frequência para os dois ensaios molhados, pois estes apresentavam maior riqueza de detalhes em relação ao desenvolvimento do movimento de massa.

Para a filtragem dos sinais, optou-se por utilizar um filtro do tipo média móvel. Trata-se de um filtro simples e que apresenta bom desempenho. Consiste no cálculo de uma média a partir de um determinado número de pontos n do sinal de entrada. Cada ponto de saída do filtro é calculado a partir da média dos n pontos anteriores e sucessores do ponto a ser calculado.

No ensaio seco, no qual os acelerômetros AF coletaram dados com frequência de 400Hz, foi utilizado o filtro de média móvel com $n = 5$ e nos ensaios molhados, nos quais utilizou-se frequência de aquisição de 4.000Hz, o filtro foi utilizado com $n = 50$ pontos. A escolha do número de pontos se baseou na análise qualitativa dos dados de entrada e de saída. Buscou-se utilizar o maior número de pontos 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. Embora pareça um procedimento simples, 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 do movimento do solo é necessário subtrair a componente correspondente à gravidade terrestre. Assim, os dados brutos de aceleração devem passar por duas etapas de filtragem: a primeira, para remover *outliers* e a segunda, para remover o *offset*. 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. Com estes dois dados resultantes das etapas de filtragem, calcula-se a aceleração do exclusiva do movimento do solo, ao subtrair os dados suavizados dos dados filtrados. Posteriormente, essa aceleração é, então, integrada no tempo para calcular, finalmente, a velocidade. A Figura 4.7 apresenta um fluxograma com as etapas adotadas nesta pesquisa para calcular a velocidade do movimento do solo a partir dos dados de aceleração.

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.

Na etapa de filtragem foi utilizado um filtro tipo *Butterworth* e para a etapa de filtragem para suavização, foi calculada a média móvel.

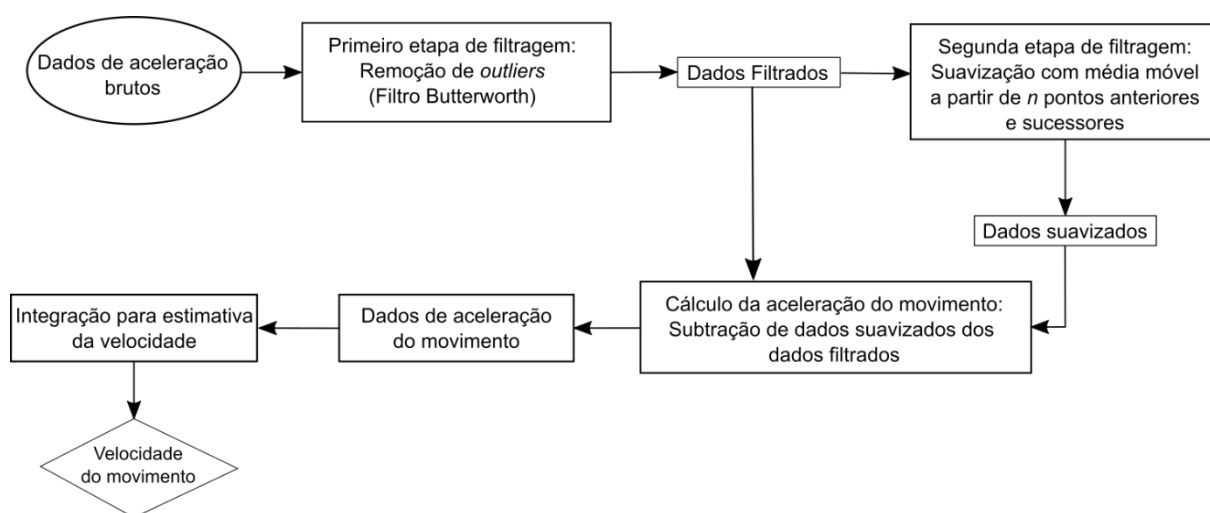


Figura 4.7: Fluxograma de etapas necessárias para calcular a velocidade a partir da aceleração.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Resultados dos Ensaio de Caracterização do solo utilizado

A Figura 5.1 apresenta a curva granulométrica resultante do ensaio realizado de peneiramento de grãos. O solo utilizado é composto por 1,4% de areia grossa, 76,6% de areia média e 22,0% de areia fina, com coeficiente de não uniformidade (CNU) de 1,9, o que o caracteriza como “uniforme” e coeficiente de curvatura (CC) de 1,01, portanto trata-se de um solo bem graduado.

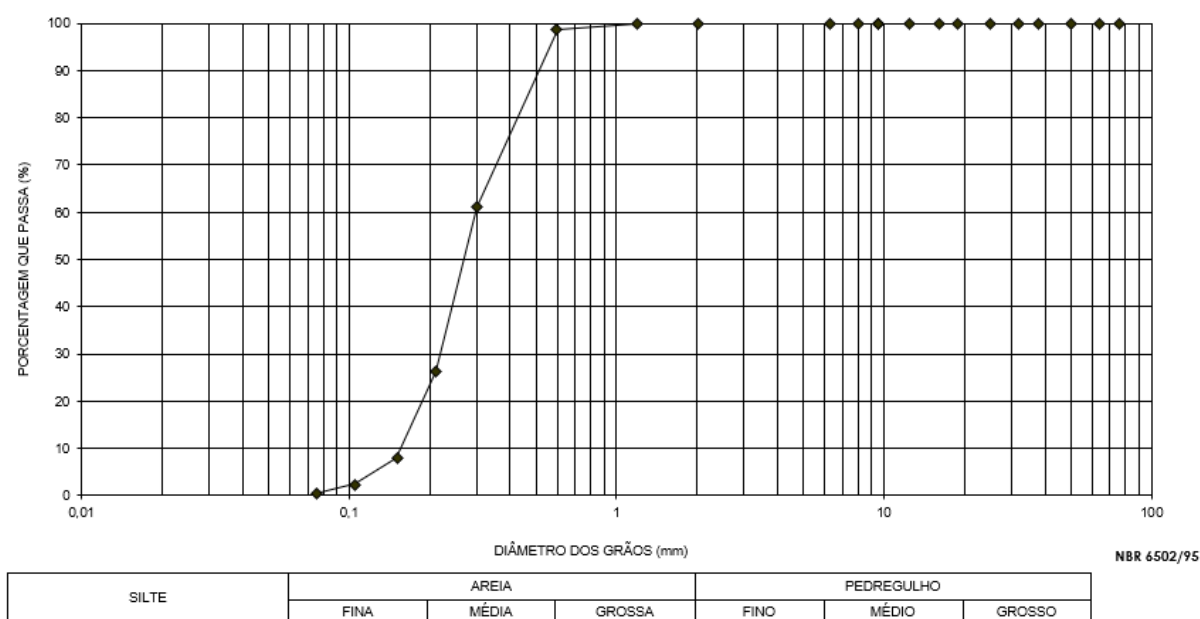


Figura 5.1: Curva de distribuição granulométrica do solo utilizado nos ensaios de simulação de escorregamentos.

Os resultados dos ensaios de caracterização para determinação dos índices de vazios mínimo e máximo e da massa específica dos sólidos estão sumarizados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Parâmetros de caracterização do solo

Parâmetro	Valor
Índice de vazios mínimo (e_{\min})	0,70
Índice de vazios máximo (e_{\max})	0,92
Massa específica seca máxima ($\rho_{d\max}$)	1,564 g/cm ³
Massa específica seca mínima ($\rho_{d\min}$)	1,380 g/cm ³
Massa específica dos sólidos (ρ_s)	2,653 g/cm ³

A Figura 5.2 apresenta a envoltória de ruptura obtida no ensaio de cisalhamento direto. O ensaio foi realizado na condição de máxima densidade do solo e em cinco tensões

normais: 10, 20, 40, 80 e 100kPa. A coesão do solo é igual a 0 kPa, uma vez que este se encontrava em condições totalmente secas. O ângulo de atrito calculado é de 31°.

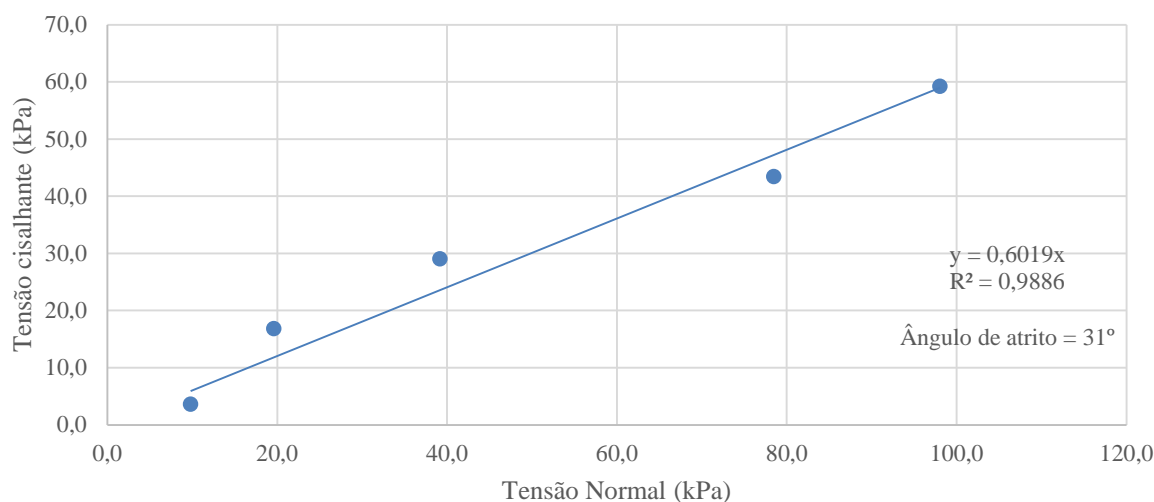


Figura 5.2: Envoltória de ruptura obtida no ensaio de cisalhamento direto.

5.2. Resultados dos Ensaio de Simulação de Escorregamentos

São apresentados nesta seção os resultados de um ensaio de simulação realizado em condições secas e dois ensaios realizados em condições molhadas.

5.2.1. Ensaio 1 – seco: observações macroscópicas

O primeiro ensaio foi realizado em condições secas, seguindo o procedimento descrito no item 4.4.1. Foram utilizados seis acelerômetros AF e dois, BF e o posicionamento dos mesmos durante o ensaio consta da Figura 5.3. Quatro acelerômetros AF, os dois acelerômetros BF foram instalados no solo, na camada acima do geotêxtil e um AF foi posicionado abaixo do geotêxtil. O último acelerômetro AF foi instalado na parede externa da caixa, com o objetivo de medir dados de aceleração sem movimentação do solo e servir, portanto, como uma referência de sinal sem movimentação de solo. Neste ensaio, os acelerômetros AF coletaram dados com frequência de 400Hz enquanto os BF, de 1Hz.

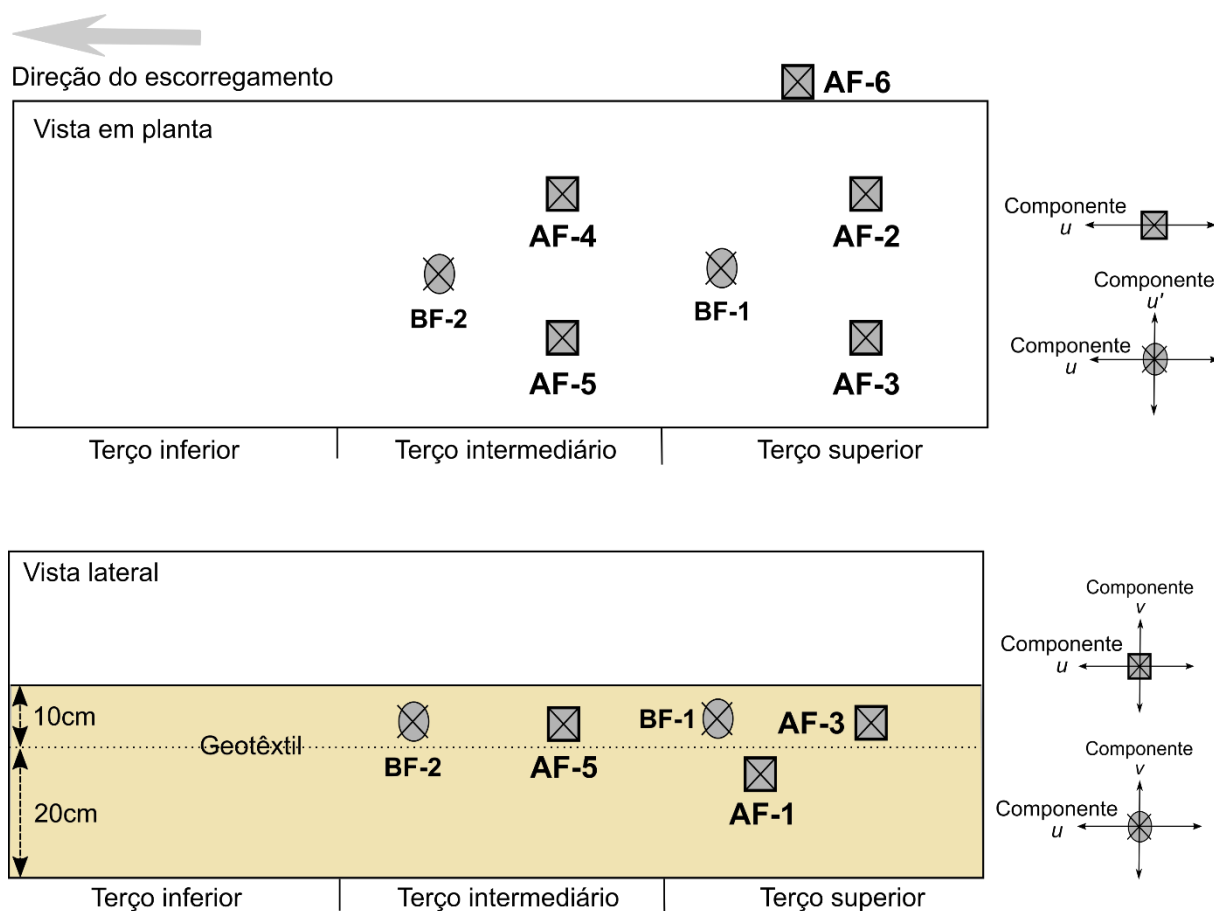


Figura 5.3: Ensaio 1 – seco: posicionamento dos acelerômetros no ensaio e das componentes de aceleração no espaço.

A caixa foi progressivamente inclinada, em intervalos regulares de tempo. A Tabela 5.2 apresenta os eventos de inclinação da caixa e as observações macroscópicas realizadas em cada evento. A ruptura macroscópica ocorreu restritamente no terço superior, quando a caixa atingiu a inclinação de 41° e aproveitou o contato entre o solo e o geotêxtil. Foi uma ruptura translacional ao longo da interface. Os acelerômetros AF-2 e AF-3 se movimentaram junto com o solo enquanto o BF-1 se manteve imóvel (Figura 5.4 e Figura 5.5).

Tabela 5.2: Ensaio 1 – seco: eventos de inclinação da caixa e observações macroscópicas realizadas.

Evento de inclinação	Inclinação	Observações macroscópicas
A	32°	-
B	34°	Escorregamentos superficiais pontuais no terço inferior.
C	36°	Escorregamentos superficiais generalizados
D	37°	Escorregamentos pontuais no terço superior (Figura 5.4)
E	38°	Escorregamentos superficiais generalizados
F	39°	Escorregamentos superficiais generalizados
G	40°	Escorregamentos superficiais generalizados
H	41°	Ruptura macroscópica (Figura 5.5)



Figura 5.4: Ensaio 1 – seco: escorregamentos superficiais no terço superior, na inclinação de 37°.

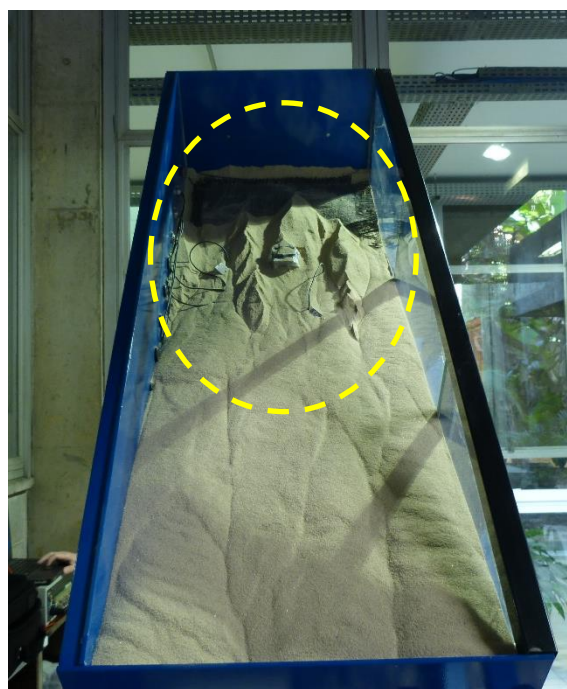


Figura 5.5: Ensaio 1 – seco: ruptura macroscópica no contato entre o geotêxtil e o solo, aos 41°.

5.2.2. Ensaio 1 – seco: resultados dos acelerômetros AF

As Figura 5.6 a Figura 5.10 apresentam os resultados de aceleração medidos nos acelerômetros posicionados dentro do volume de solo que sofreu movimentação macroscópica (AF-2 e AF-3). No eixo vertical, apresenta-se a aceleração, em g, e no horizontal, o tempo, em segundos. Nestas figuras, as letras A a H indicam os eventos de inclinação da caixa citados na Tabela 5.2.

Nas Figura 5.7 e Figura 5.8 a ruptura macroscópica é evidenciada por uma variação brusca de aceleração em ambas componentes do acelerômetro. A título de exemplo são apresentados na Figura 5.6 os sinais captados pelo acelerômetro AF-1, localizado em uma parte do solo que não foi mobilizada na ruptura. Nessa figura, essa variação não é observada, confirmando que o solo não rompeu nos locais onde este acelerômetro estava instalado.

As Figura 5.9 e Figura 5.10 mostram detalhes da aceleração medida próximo ao instante da ruptura nos AF-2 e AF-3, respectivamente. Observa-se que após o fim do evento de inclinação da caixa (indicado pela letra H') ambos os acelerômetros se mantiveram em repouso por 5s. Transcorrido esse intervalo de tempo, os dois acelerômetros registraram aumento da aceleração em ambos os eixos dos sensores até ocorrer a ruptura macroscópica, após 5,5s (AF-2) e 4,0s (AF-3).

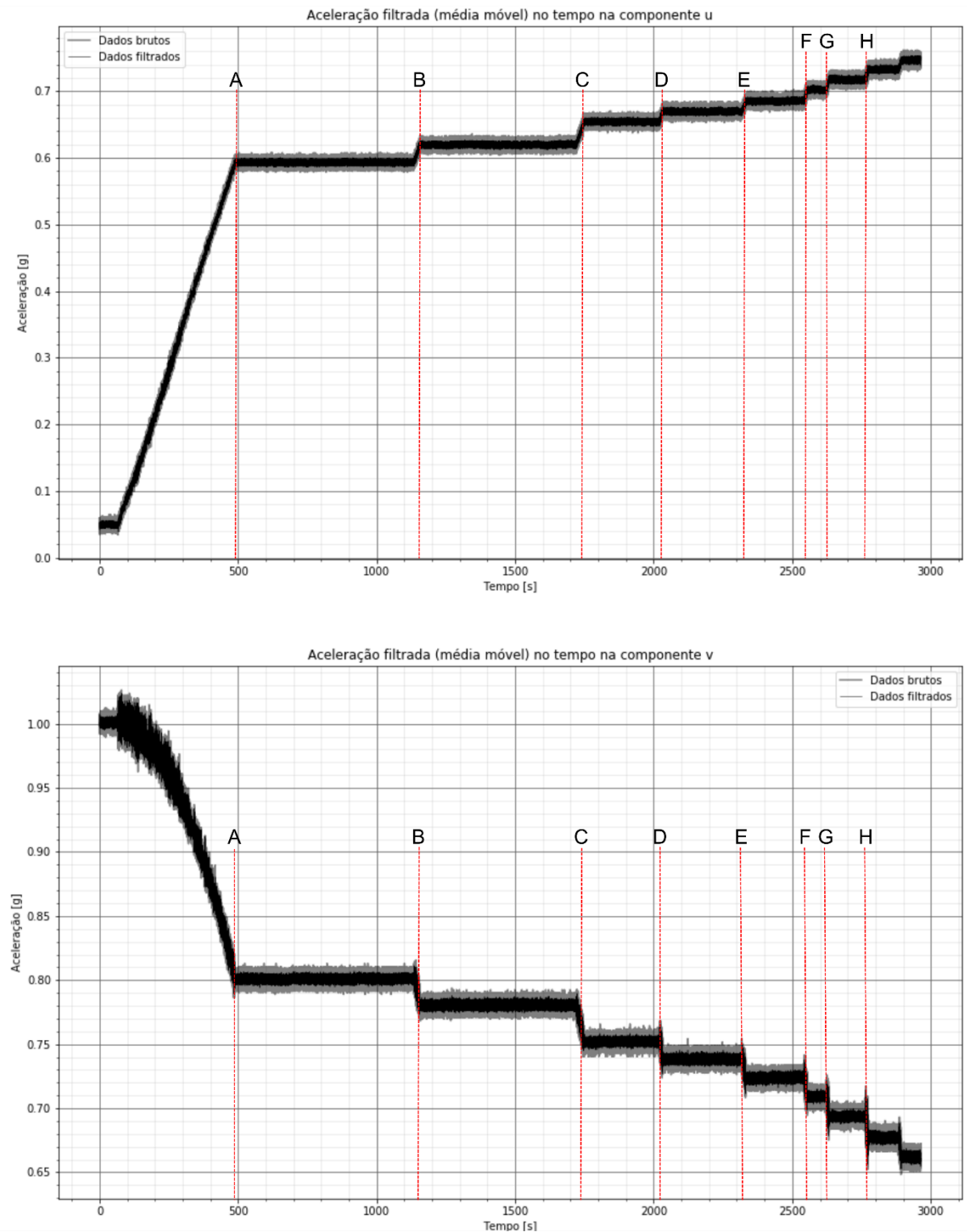


Figura 5.6: Ensaio 1 – seco, AF-1: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto. As letras A até H indicam os eventos de inclinação da caixa.

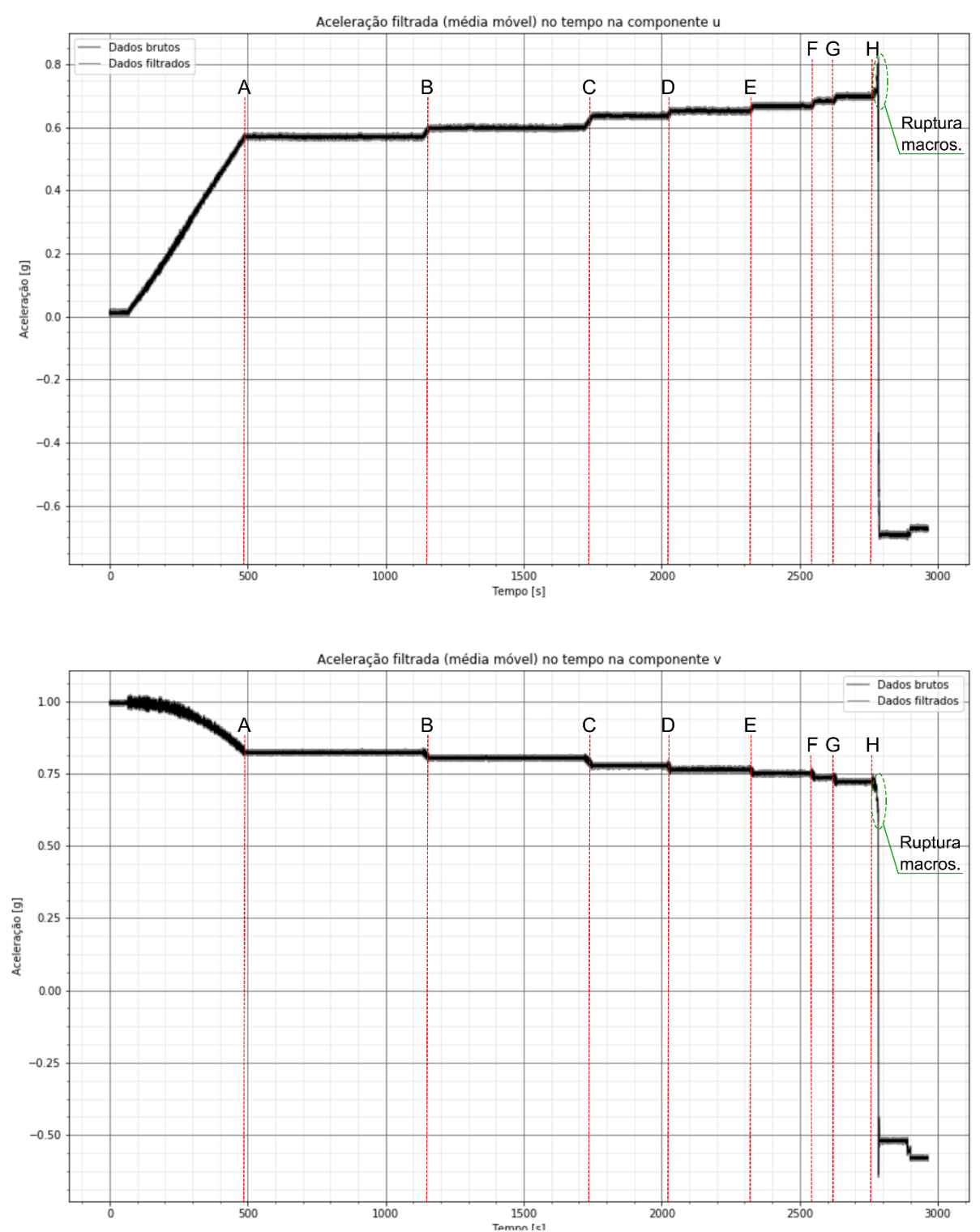


Figura 5.7: Ensaio 1 – seco, AF-2: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto. As letras A até H indicam os eventos de inclinação da caixa.

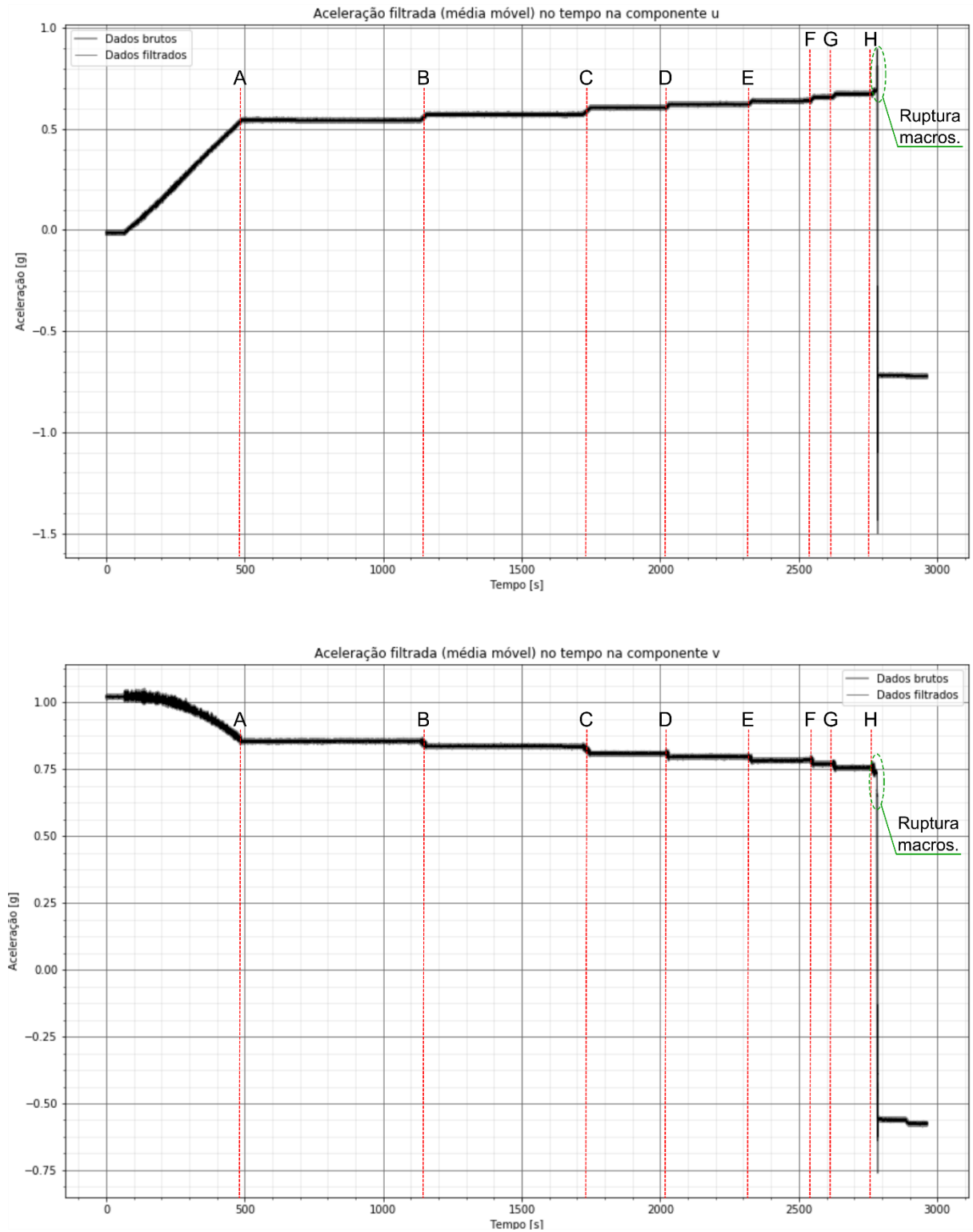


Figura 5.8: Ensaio 1 – seco, AF-3: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto. As letras A até H indicam os eventos de inclinação da caixa.

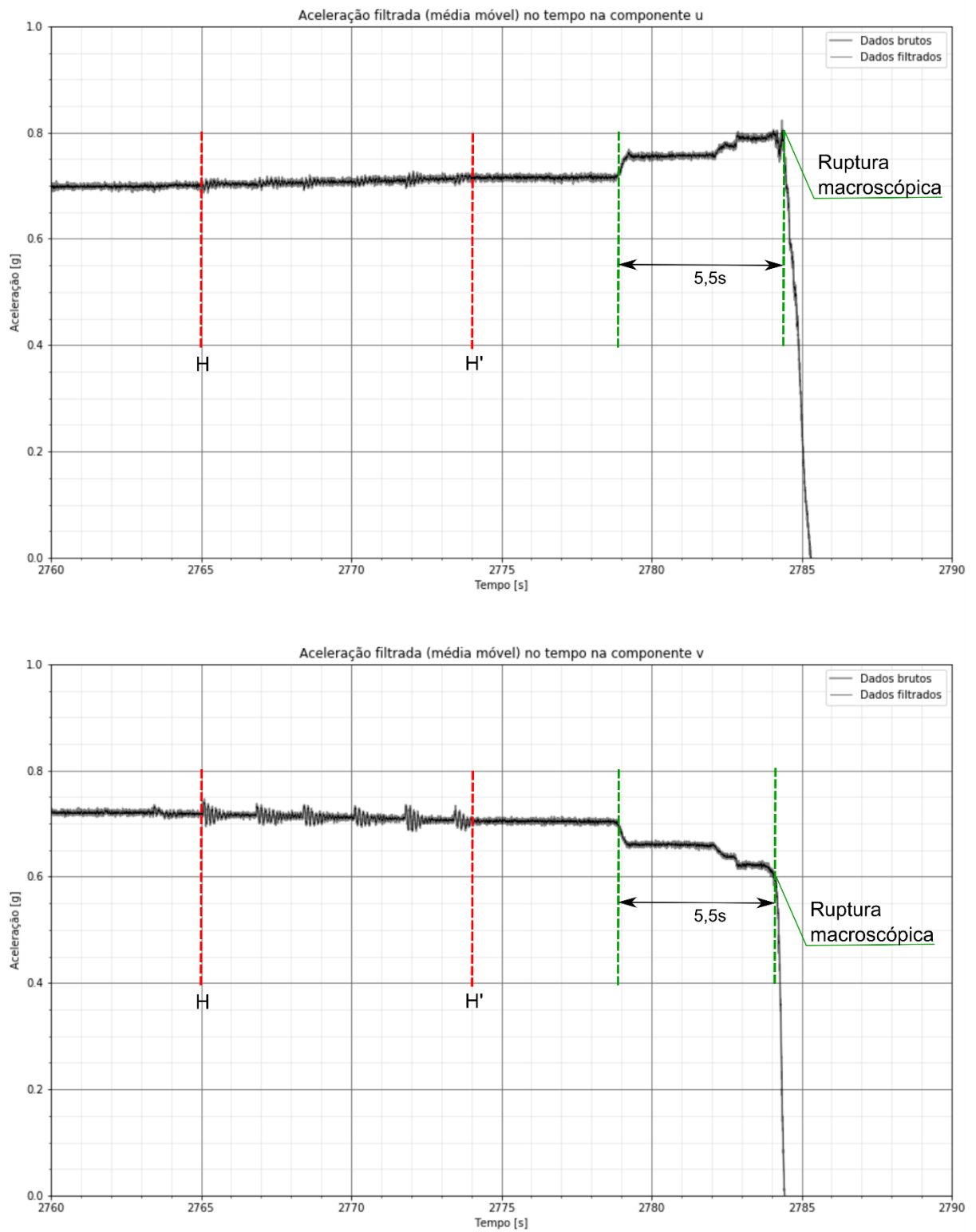


Figura 5.9: Ensaio 1 – seco, AF-2: aceleração medida nas componentes u e v , próximo ao instante da ruptura. Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto. As letras H e H' indicam o início e o fim do evento de inclinação da caixa respectivamente.

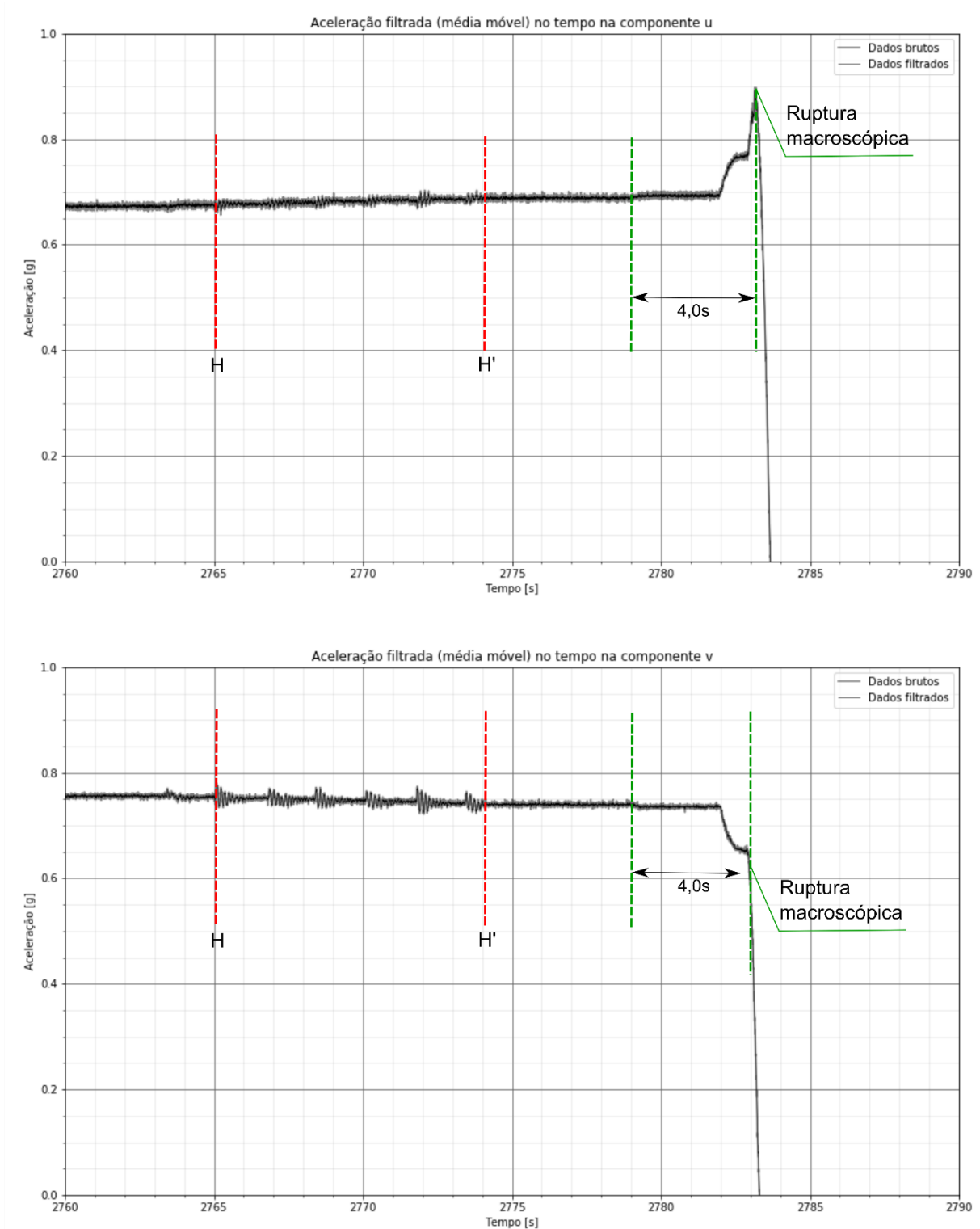


Figura 5.10: Ensaio 1 – seco, AF-3: aceleração medida nas componentes u e v , próximo ao instante da ruptura. Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto. As letras H e H' indicam o início e o fim do evento de inclinação da caixa respectivamente.

5.2.3. Ensaio 1 – seco: resultados dos acelerômetros BF

Os acelerômetros BF-1, localizado no terço superior e BF-2, no terço intermediário não se movimentaram durante o ensaio, conforme citado anteriormente e por esta razão os resultados não serão apresentados. Embora o BF-1 estivesse posicionado na região onde se desenvolveu o escorregamento, a movimentação de volume de solo foi relativamente pequena para movimentar também o acelerômetro BF-1 (Figura 5.11), o que sugere que para os ensaios realizados nesta escala e nesta condição de umidade, o tamanho do acelerômetro BF é demasiado, podendo inclusive ter atuado como um objeto de contenção do solo e impedido a movimentação do solo ao seu redor em condições secas.

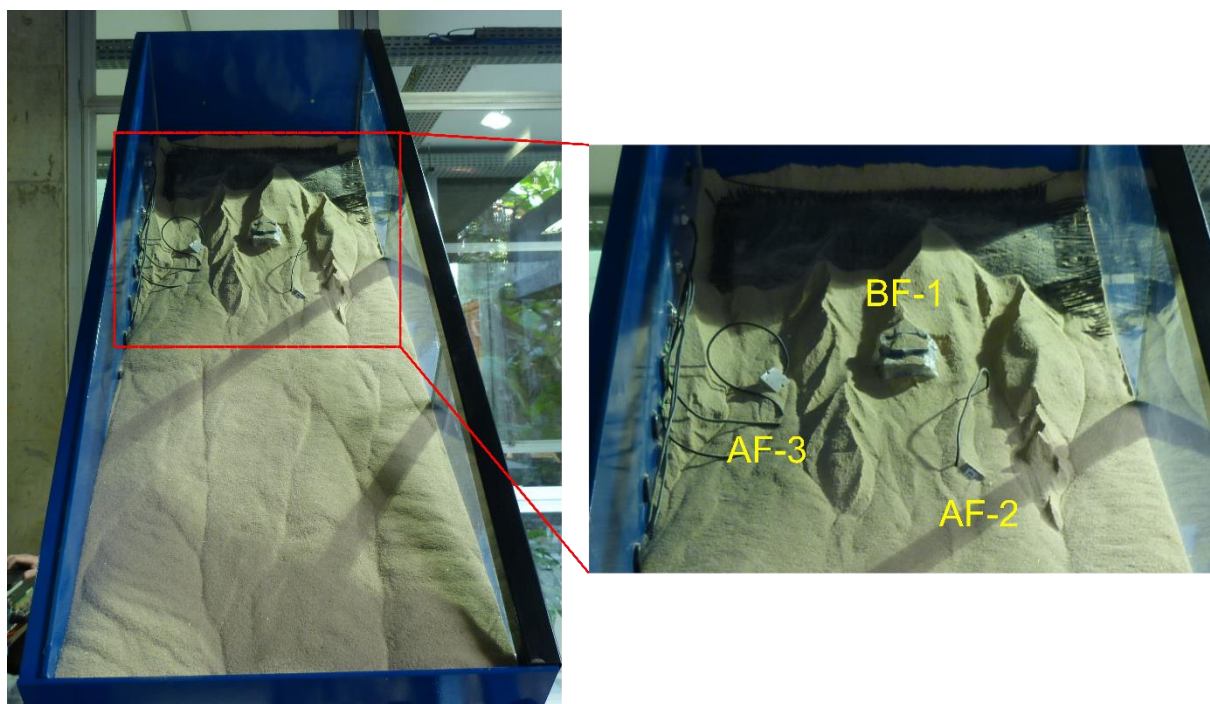


Figura 5.11: Ensaio 1 – seco: detalhe do escorregamento simulado e do posicionamento dos sensores após a ruptura macroscópica. Observa-se que o BF-1 se manteve no mesmo lugar enquanto os AF-2 e AF-3, se movimentaram junto com o solo.

5.2.4. Ensaio 2 – molhado: observações macroscópicas

O segundo ensaio foi realizado em condições molhadas, seguindo o procedimento de montagem do experimento descrito no item 4.4.2. Foram instalados cinco acelerômetros AF e um acelerômetro BF enterrados no solo. Um acelerômetro AF foi fixado na parede metálica externa da caixa com o objetivo de os dados coletados serem utilizados como referência de não movimentação do solo. A

Figura 5.12 apresenta o posicionamento dos acelerômetros no ensaio 2. Neste ensaio, os acelerômetros AF coletaram dados com frequência de 4.000Hz enquanto os BF, de 1Hz.

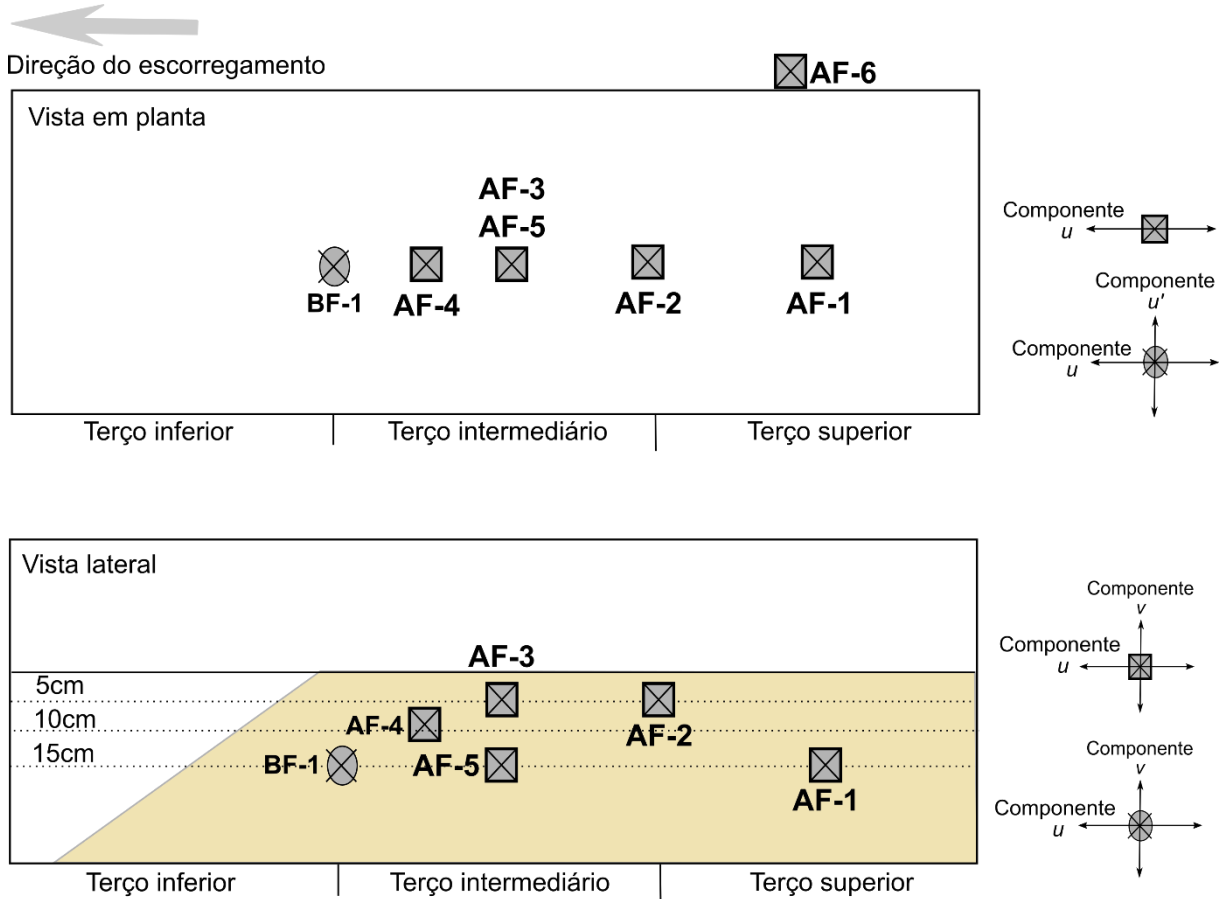


Figura 5.12: Ensaio 2 – molhado: posicionamento dos acelerômetros no ensaio e das componentes de aceleração no espaço.

Após o preenchimento da caixa e construção do talude em condições saturadas do solo, a caixa foi mantida na posição horizontal, sem fornecimento de água por aproximadamente duas horas, intervalo de tempo no qual aconteceu a drenagem parcial do solo. Após este intervalo de tempo, a caixa foi inclinada até 30° com o fornecimento de água desligado. Após atingir 30° de inclinação, o fornecimento de água foi ligado e a vazão foi aumentada progressivamente, a saber:

- 0 a 1.240s = 2,0 L/min
- 1.240 a 2.290s = 4,4 L/min
- 2.290 até a ruptura final = 13,0 L/min

As vazões efluentes da torneira que alimenta a mangueira colocada na caixa de ensaio foram determinadas previamente ao início dos ensaios para cada posição do registro utilizando-se um recipiente de volume conhecido e um cronômetro.

Desde o início do ensaio foi constatado o desenvolvimento de duas trincas no terço intermediário da caixa. Decorridos 340s do início do ensaio, ocorreu o desprendimento de um bloco de solo, localizado entre o terço inferior e o terço intermediário. Aos 2.340s desprendeu-se outro bloco, localizado entre o terço intermediário e o terço superior. A ruptura total ocorreu após 2.600s desde o início do ensaio. A Figura 5.13 apresenta esquematicamente numa linha do tempo os eventos de aumento de vazão realizados durante o ensaio e as observações macroscópicas e as Figura 5.14 e Figura 5.15 ilustram os instantes de desprendimento de blocos no terço intermediário.

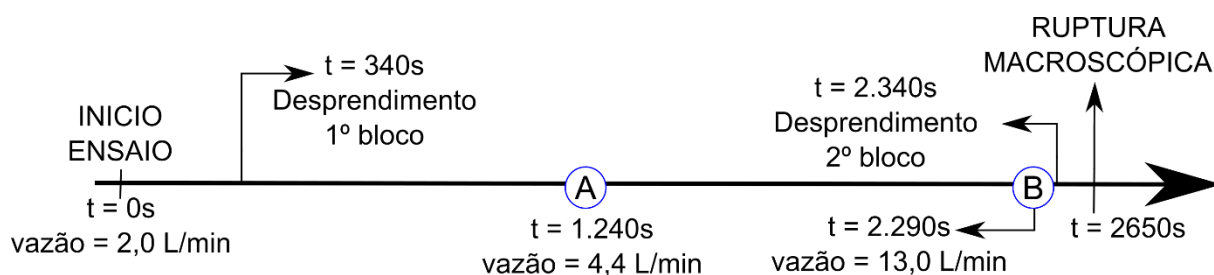


Figura 5.13: Ensaio 2 – molhado: linha do tempo dos eventos observados macroscopicamente durante o ensaio. Letras A e B indicam os eventos de aumento de vazão mostrados nas figuras subsequentes.

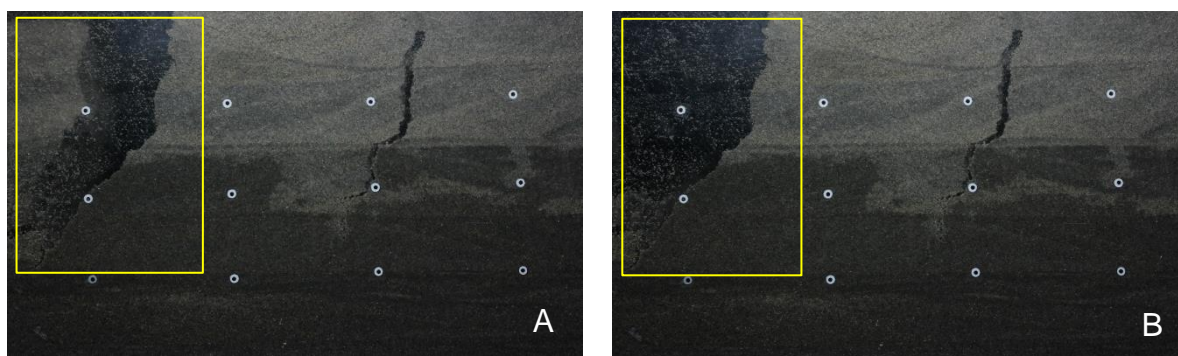


Figura 5.14: Ensaio 2 – molhado, vista do terço intermediário da caixa. Desprendimento de bloco de solo localizado entre o terço inferior e o terço intermediário, aos 340s. A) Foto antes do desprendimento; B) foto após o desprendimento.

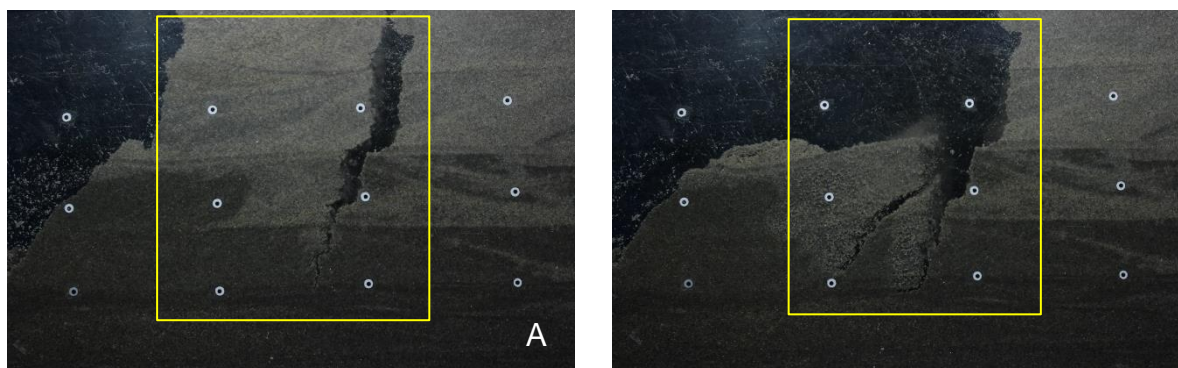


Figura 5.15: Ensaio 2 – molhado, vista do terço intermediário da caixa. Desprendimento de bloco de solo localizado no terço intermediário, aos 2.340s. A) Foto antes do desprendimento; B) foto depois do desprendimento.

5.2.5. Ensaio 2 – molhado: resultados dos acelerômetros AF

As Figura 5.16 a Figura 5.25 apresentam os resultados de aceleração medidos nos acelerômetros posicionados dentro do solo (AF-1 a AF-5). No eixo vertical, apresenta-se a aceleração em g e no horizontal, o tempo, em segundos. As letras A e B com linhas azuis indicam os instantes de aumento de vazão.

Observa-se que os acelerômetros AF-1 e AF-2 (Figura 5.16 e Figura 5.17), localizados no terço superior e entre o terço superior e o intermediário, respectivamente, apresentam comportamento semelhante, com aceleração que se mantém praticamente constante até instantes antes da ruptura. No acelerômetro AF-1, a ruptura foi medida aos 2.650s enquanto no acelerômetro AF-2, aos 2.612s. Avaliando em detalhe os dados de aceleração de ambos acelerômetros (Figura 5.18 e Figura 5.19), nota-se que no acelerômetro AF-1 o incremento de aceleração que levou à ruptura se iniciou aos 2.612s e no acelerômetro AF-2, aos 2.390s. Em ambos os casos, o aumento de aceleração que resulta na ruptura macroscópica, ocorre aproximadamente dois minutos após o segundo aumento de vazão de água, o que sugere haver uma relação entre a dinâmica do movimento e o incremento de água no solo.

Os acelerômetros AF-3 e AF-5 (Figura 5.20 e Figura 5.21), localizados no meio do terço intermediário, também apresentam comportamento semelhante entre si. Observa-se um pico de aceleração em ambos os casos aos 1.415s, o qual coincide com o desprendimento do segundo bloco descrito no item anterior e a ruptura macroscópica é identificada aos 2.390s. Ao analisar em detalhe as acelerações antes do instante do desprendimento do bloco (Figura 5.22 e Figura 5.23), nota-se que o AF-3 começou a medir o aumento de aceleração aos 1.250s e o AF-5, aos 1.325s, antes de ocorrer o desprendimento macroscópico do bloco onde estes

acelerômetros estavam instalados. O aumento de aceleração ocorre 10s após o incremento de vazão no AF-3 e 85s no AF-5, de forma semelhante ao que havia ocorrido nos AF-1 e AF-2. O desprendimento do bloco ocorre após aproximadamente três minutos do evento de aumento de vazão.

Por fim, o acelerômetro AF-4 (Figura 5.24), localizado entre o terço intermediário e o terço inferior, mostra um comportamento diferente dos outros quatro acelerômetros, com um pico na aceleração aos 340s. Este pico corresponde ao desprendimento do primeiro bloco descrito anteriormente. Ao observar em detalhe a aceleração antes do desprendimento do bloco, nota-se que desde o início do ensaio, o acelerômetro já registrava acelerações crescentes. Provavelmente, este comportamento é justificado porque o AF-4 estava posicionado próximo ao talude construído e, portanto, num local mais instável quando comparado aos outros acelerômetros. Estes resultados sugerem que a região em que o AF-4 estava instalado já estava se movimentando quando se iniciou a contagem dos tempos, apesar de macroscopicamente este efeito não ser perceptível. Mesmo assim, observa-se que a partir dos 210s ocorre um aumento pronunciado da aceleração que leva ao desprendimento do bloco, aos 340s (Figura 5.25).

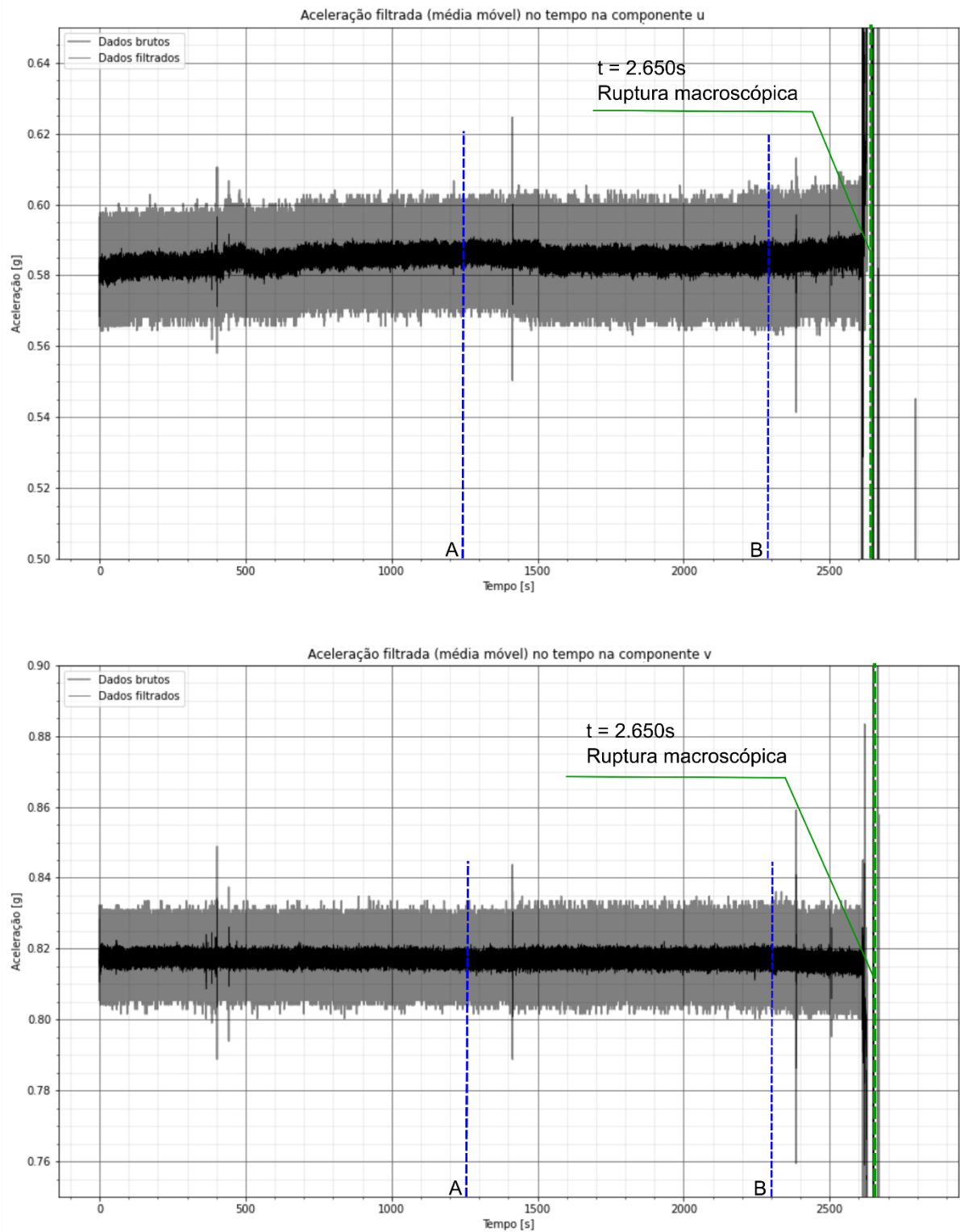


Figura 5.16: Ensaio 2 – molhado, AF-1: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto. As letras A e B indicam os instantes em que foi realizado o aumento de vazão.

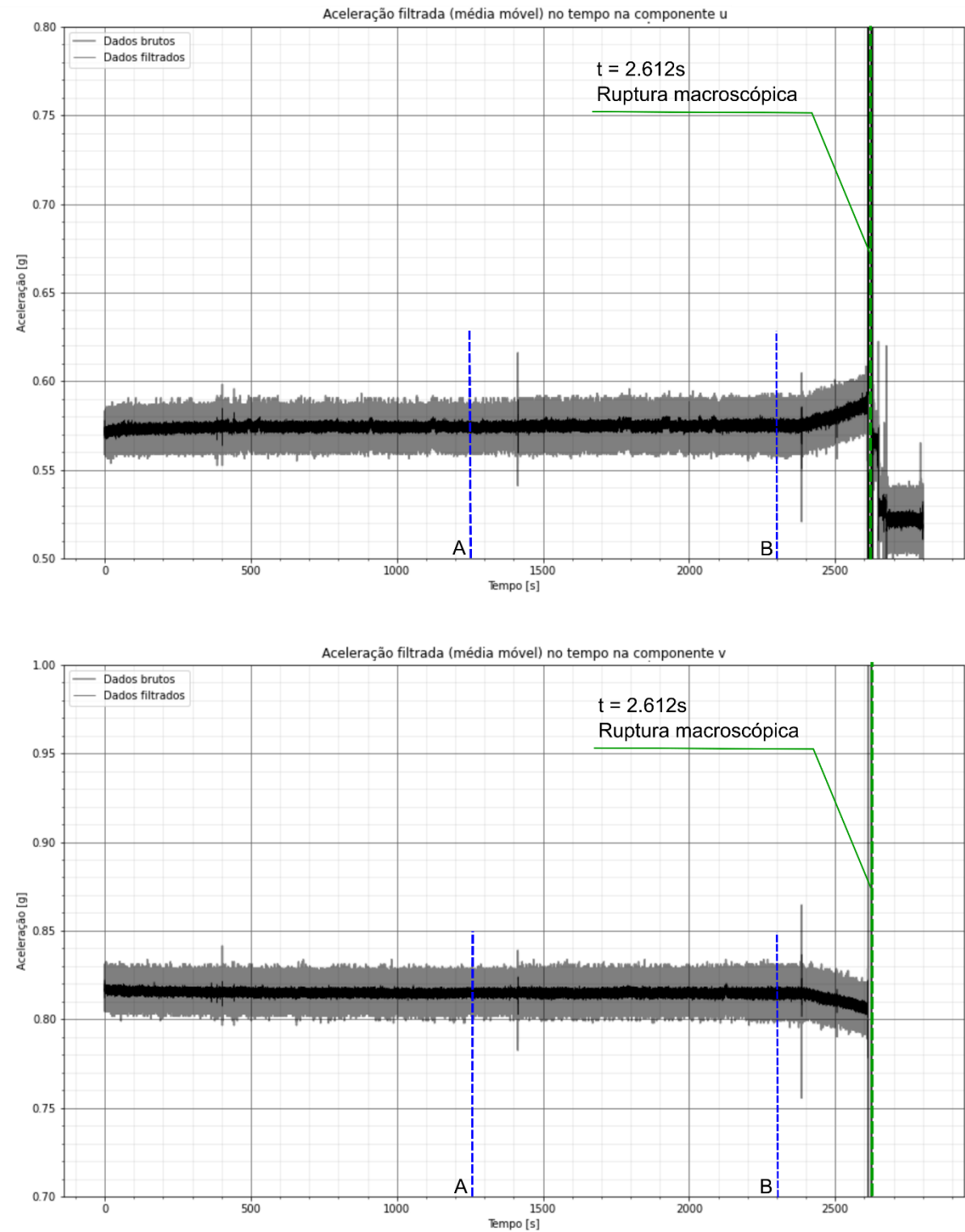


Figura 5.17: Ensaio 2 – molhado, AF-2: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto. As letras A e B indicam os instantes em que foi realizado o aumento de vazão. Nota-se que o aumento de aceleração ocorre logo após o evento B de incremento de vazão.

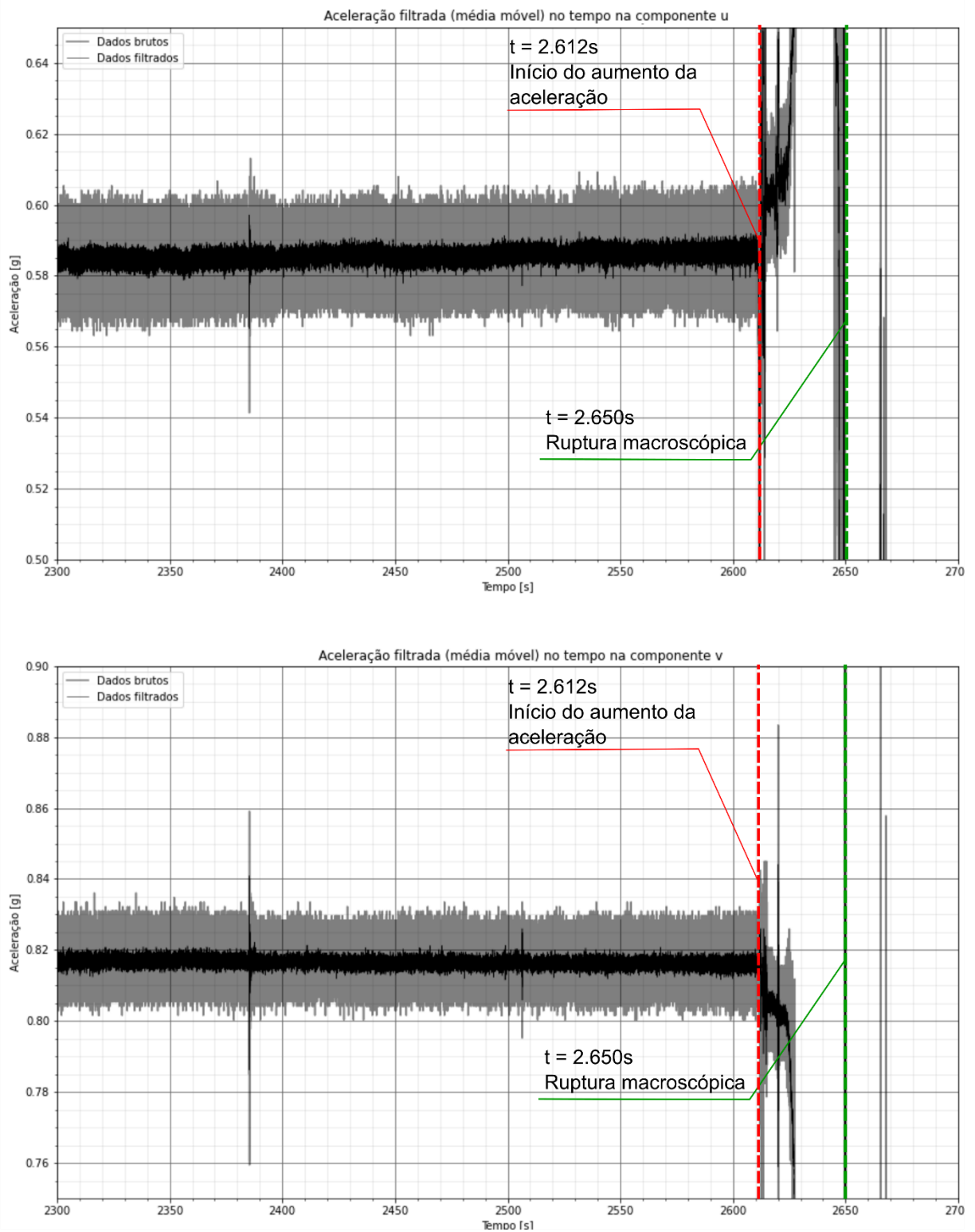


Figura 5.18: Ensaio 2 – molhado, AF-1: detalhe da aceleração medida nas componentes u e v próximo ao instante da ruptura macroscópica. Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto.

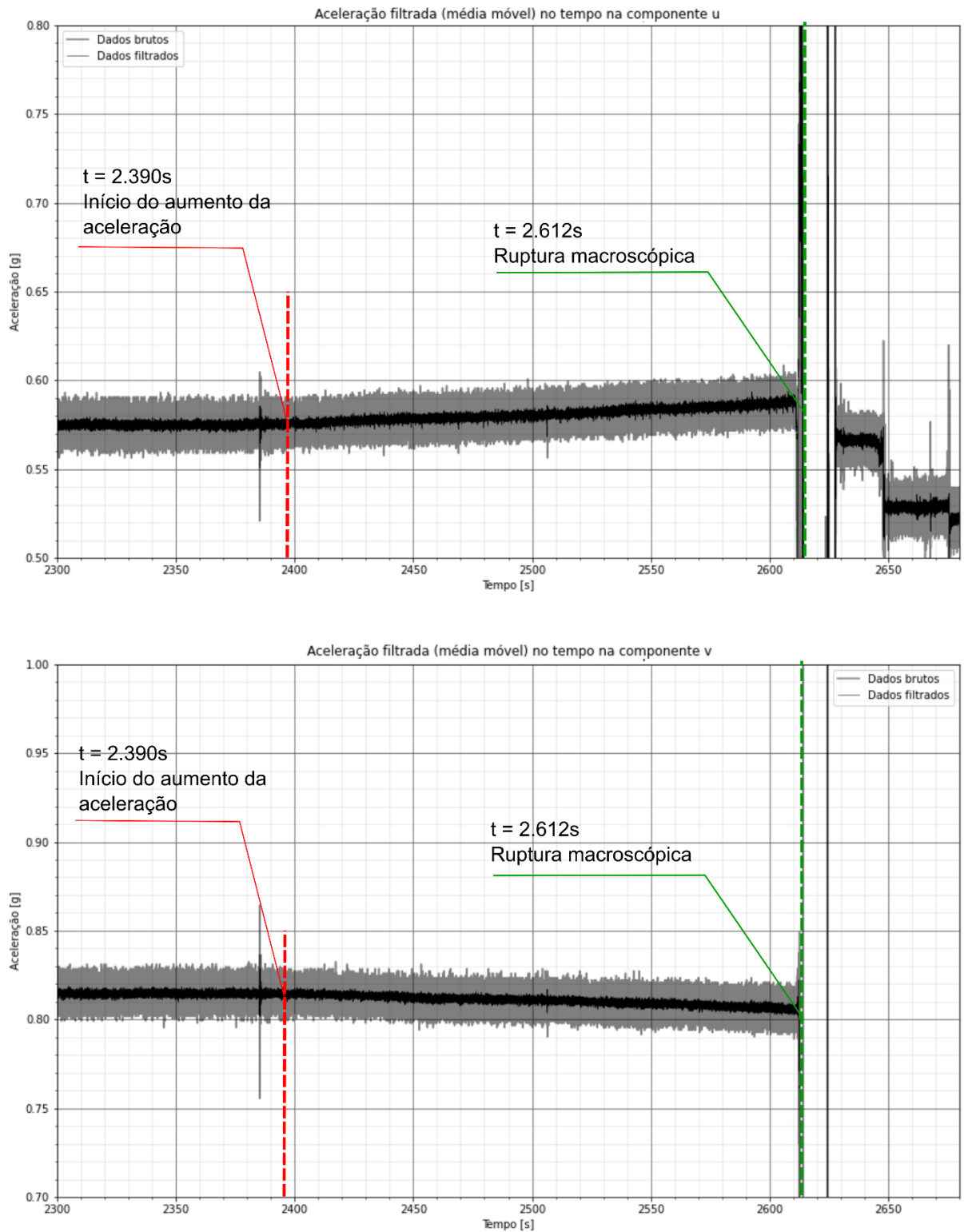


Figura 5.19: Ensaio 2 – molhado, AF-2: detalhe da aceleração medida nas componentes u e v próximo ao instante da ruptura macroscópica. Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto.

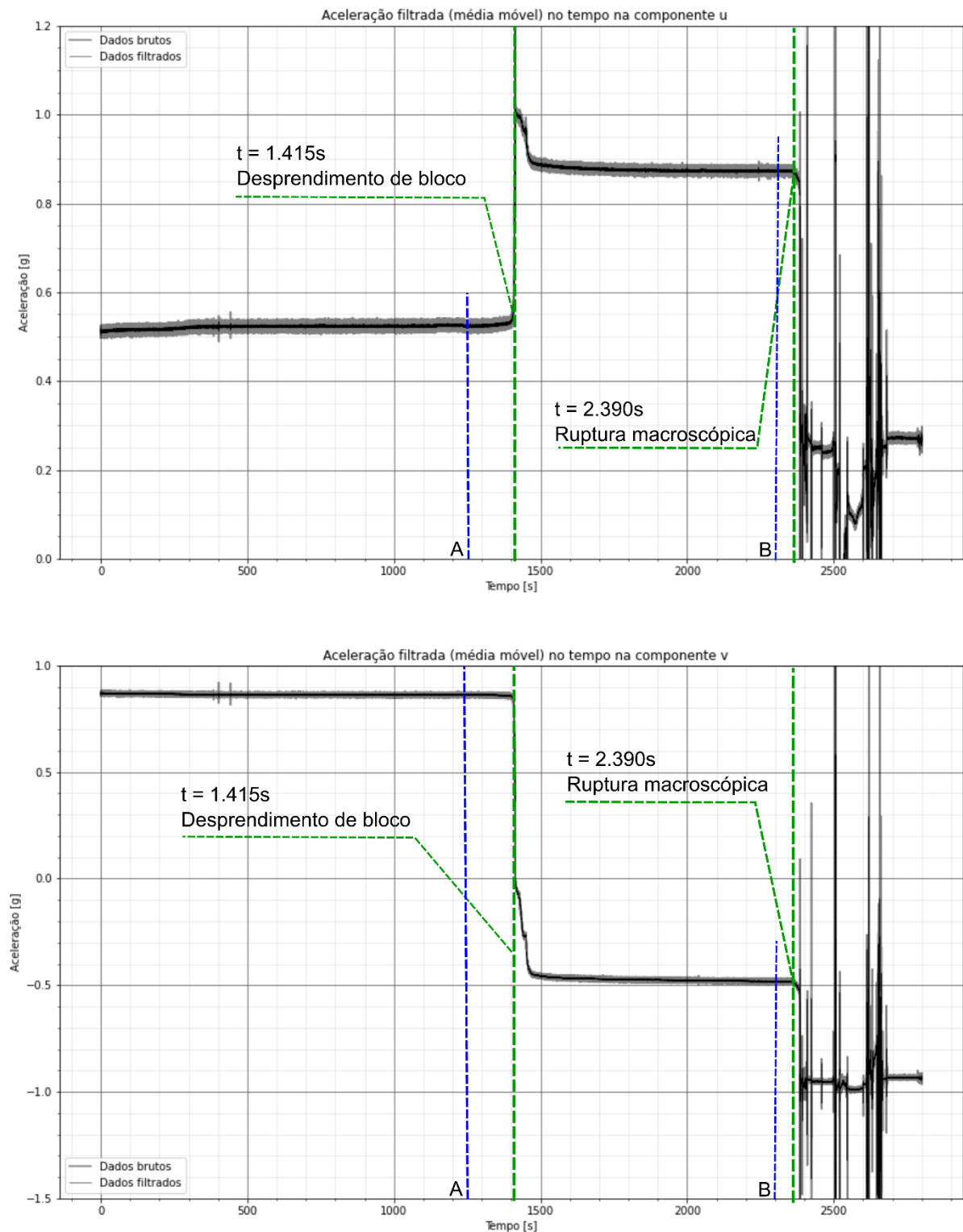


Figura 5.20: Ensaio 2 – molhado, AF-3: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto. As letras A e B indicam os instantes em que foi realizado o aumento de vazão. O aumento de aceleração ocorre logo após o evento A de incremento de vazão.

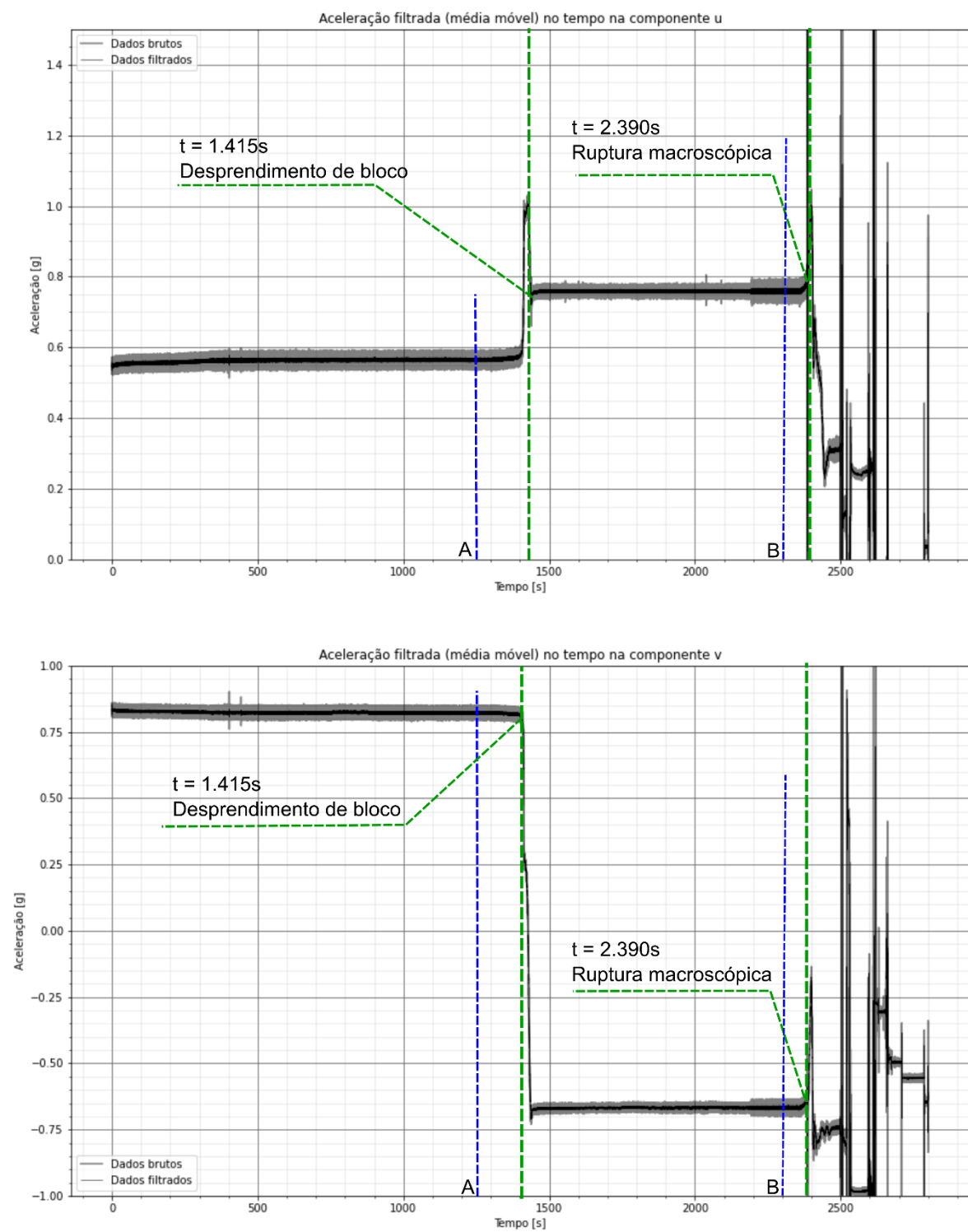


Figura 5.21: Ensaio 2 – molhado, AF-5: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto. As letras A e B indicam os instantes em que foi realizado o aumento de vazão. O aumento de aceleração ocorre logo após o evento A de incremento de vazão.

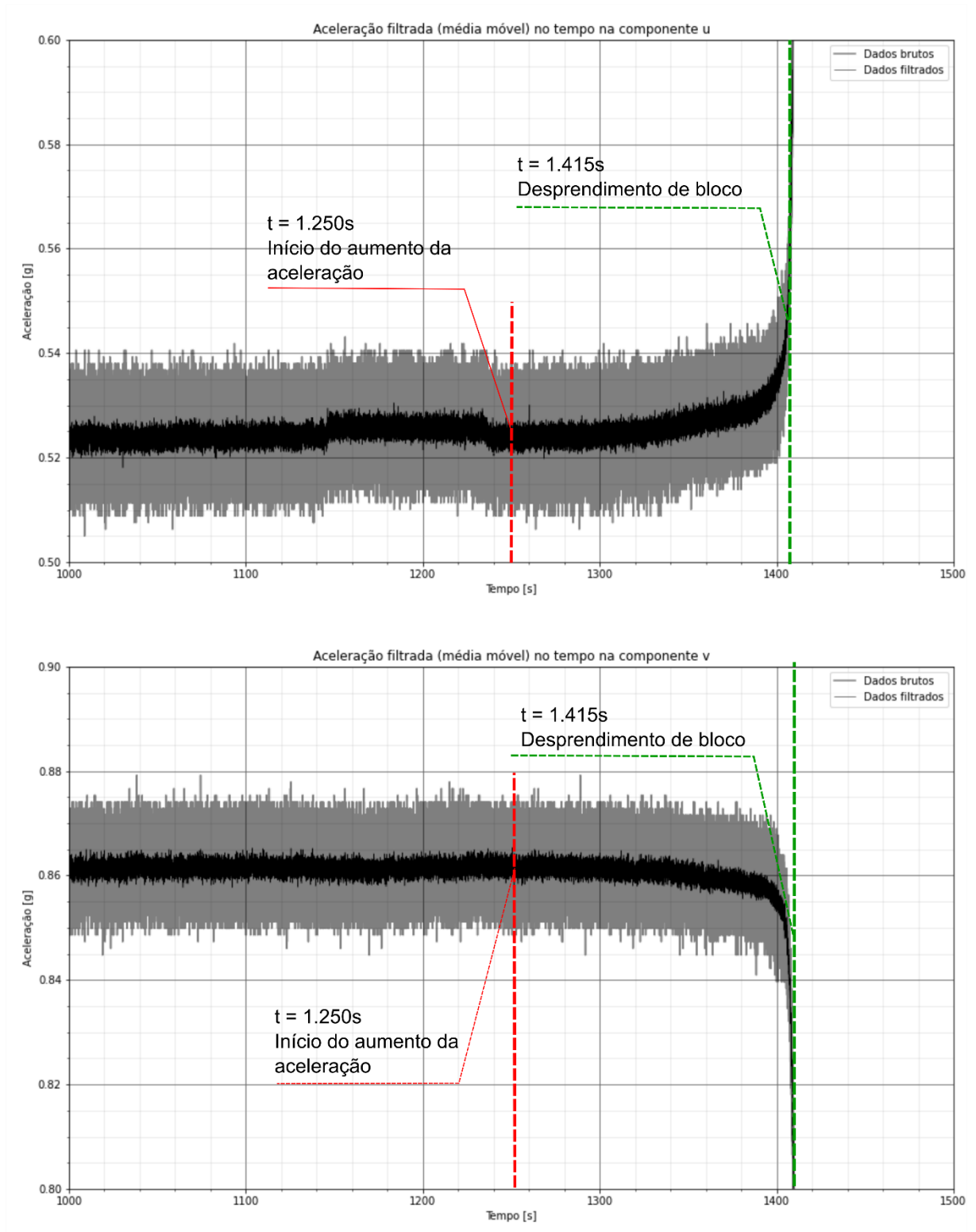


Figura 5.22: Ensaio 2 – molhado, AF-3: detalhe da aceleração medida nas componentes u e v próximo ao instante da ruptura macroscópica. Dados brutos em cinza e filtrado com média móvel, em preto.

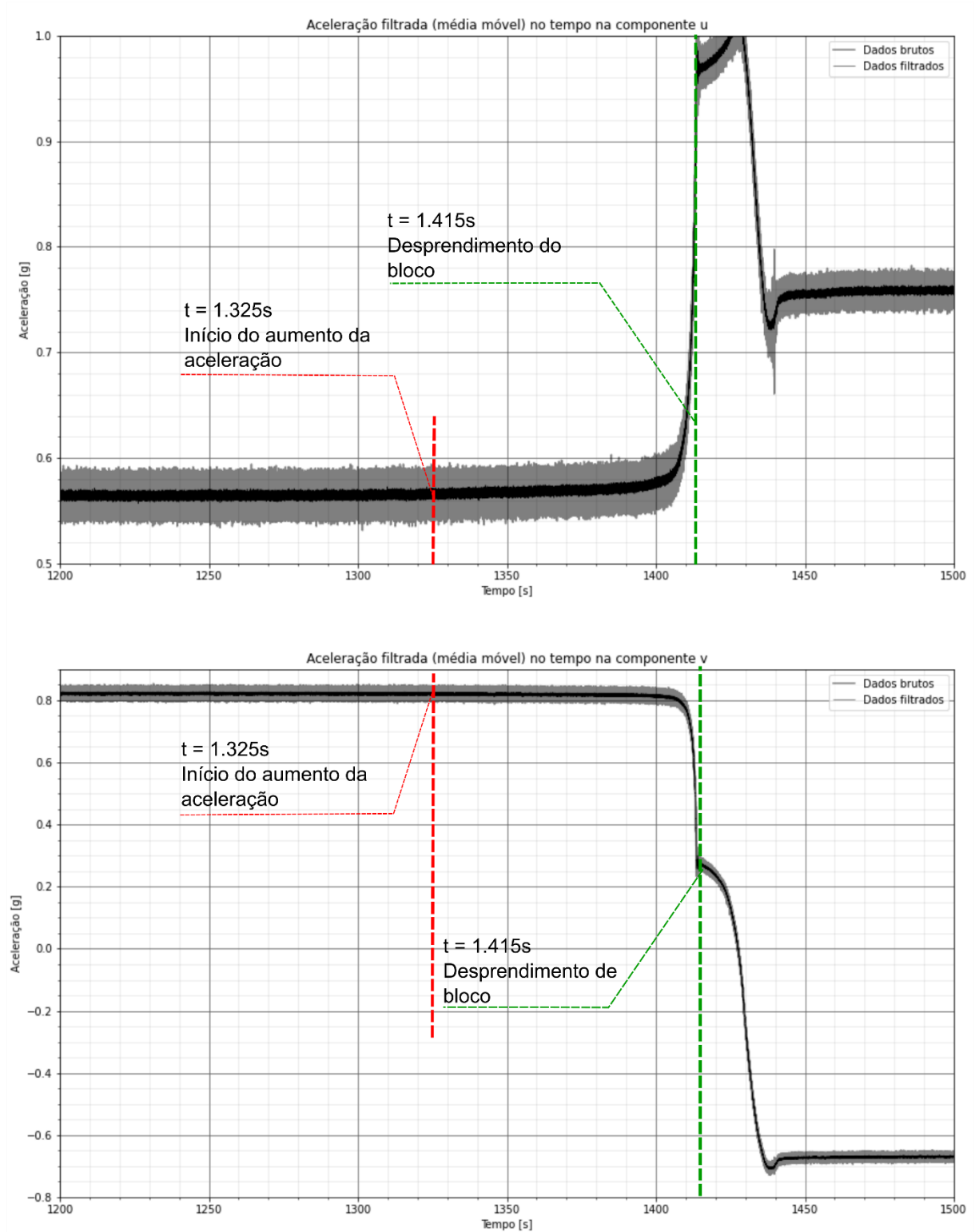


Figura 5.23: Ensaio 2 – molhado, AF-5: detalhe da aceleração medida nas componentes u e v próximo ao instante da ruptura macroscópica. Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto.

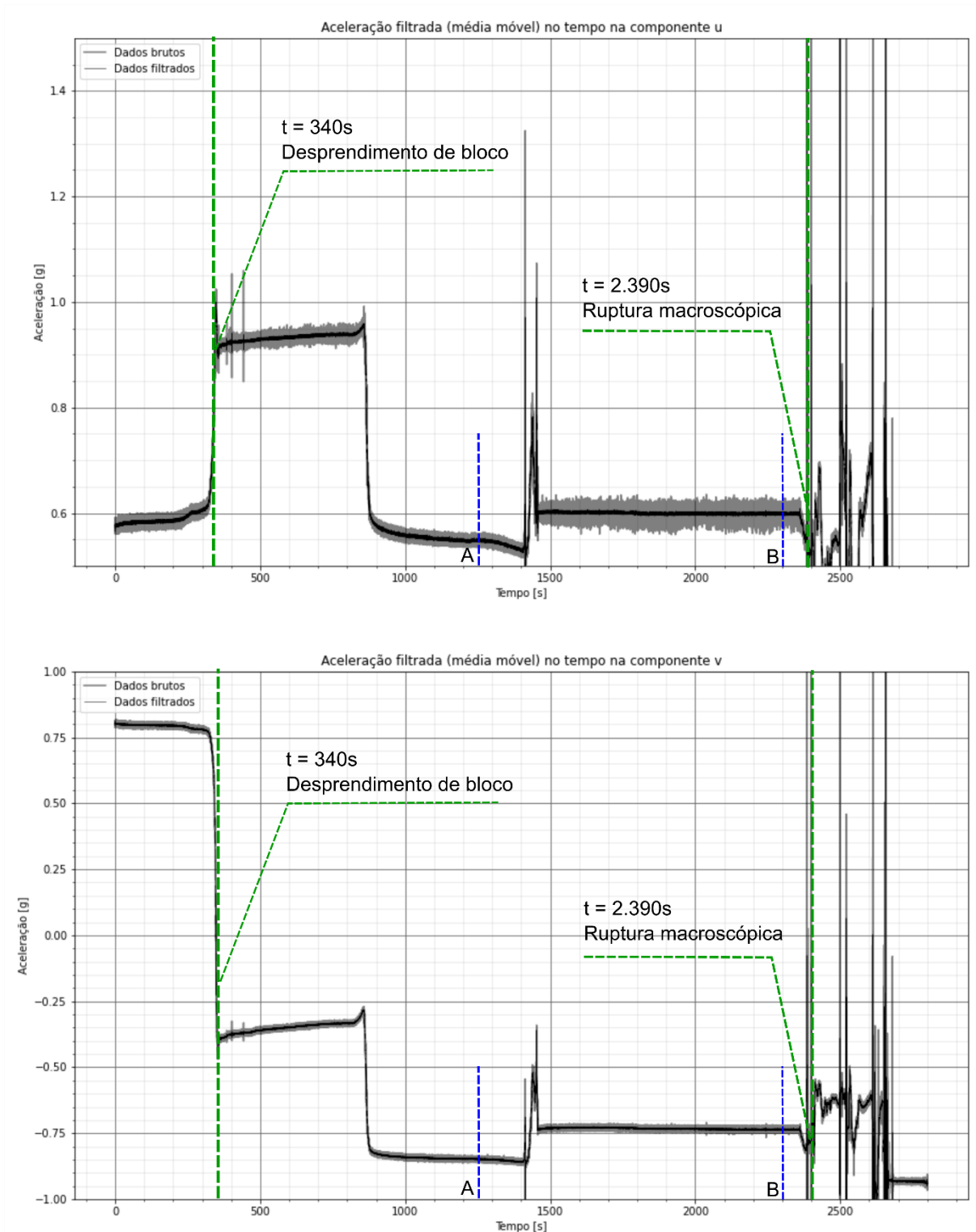


Figura 5.24: Ensaio 2 – molhado, AF-4: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto. As letras A e B indicam os instantes em que foi realizado o aumento de vazão.

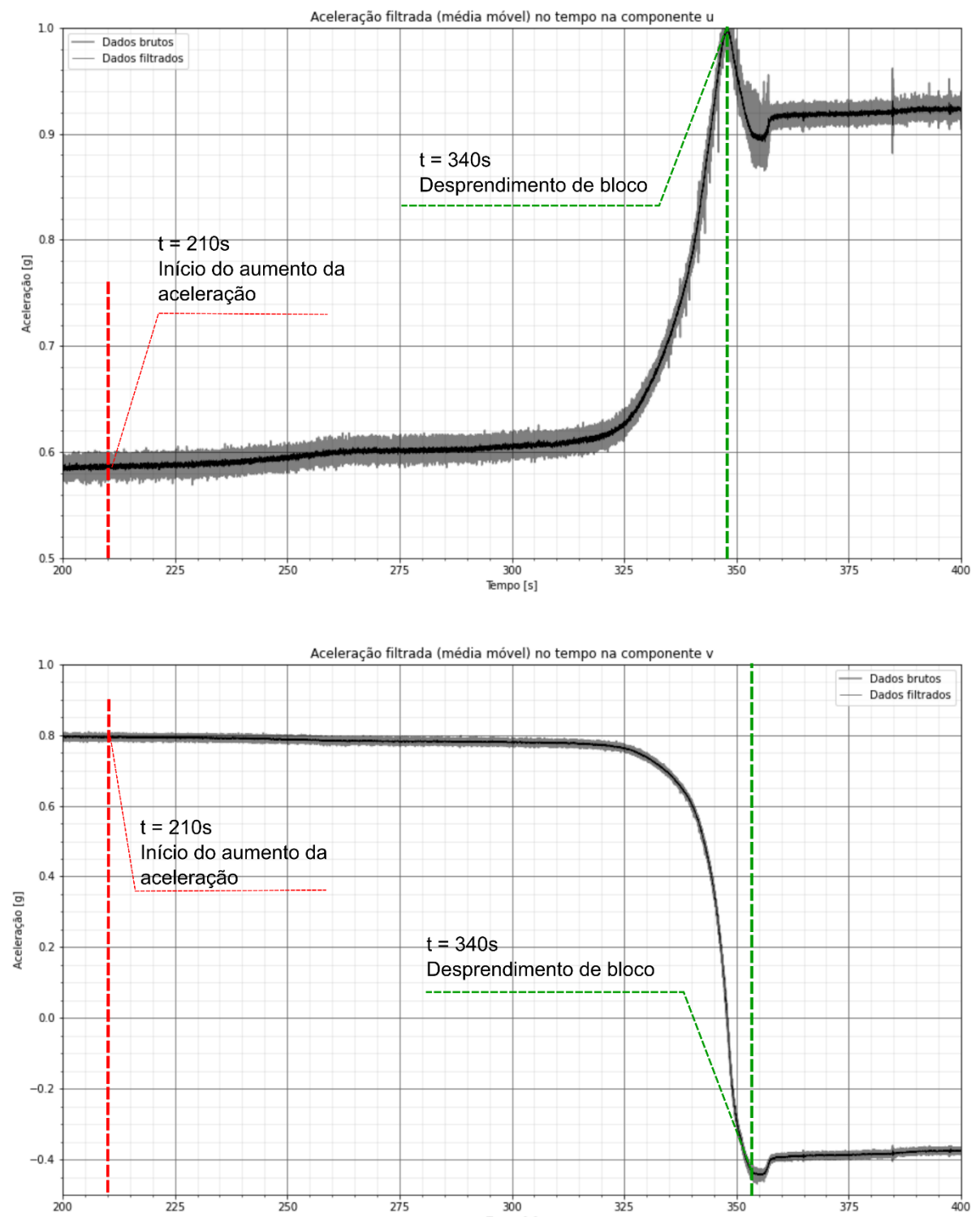


Figura 5.25: Ensaio 2 – molhado, AF-4: detalhe da aceleração medida nas componentes u e v próximo ao instante da ruptura macroscópica. Dados brutos em cinza e filtrados com média móvel, em preto.

Os resultados dos acelerômetros AF no Ensaio 2 refletem o movimento observado macroscopicamente, mas destaca-se que todos eles revelaram alterações nas leituras da aceleração previamente à ruptura macroscópica. A Figura 5.26 apresenta esquematicamente os eventos observados macroscopicamente e os eventos identificados nos dados de aceleração. Os dados coletados pelos sensores revelam que a instabilização se inicia próximo ao pé do talude (AF-4), com o desprendimento do primeiro bloco e evolui em direção ao terço intermediário, com a formação de mais trincas e de mais blocos. Estes blocos se desprendem gradualmente, entre 1.415, como observado nos AF-3 e AF-5, e 2.340s, como observado em foto. A ruptura macroscópica total é medida pelos AF-3 e AF-5 aos 2.390s. Constatou-se o aumento da aceleração no AF-2 a partir de 2.390s e a ruptura, a partir de 2.612s. Aos 2.612s o AF-1 iniciou seu registro de aumento de aceleração e a ruptura total foi identificada por este acelerômetro aos 2.650s.

Esta sequência de resultados permite-nos inferir que os acelerômetros embutidos em solo são sensores capazes de registrar alterações muito pequenas de posição e registrar com maior detalhe a formação progressiva e heterogênea das superfícies de ruptura e a movimentação diferenciada dos vários volumes de solo que se formam em um movimento de massa.

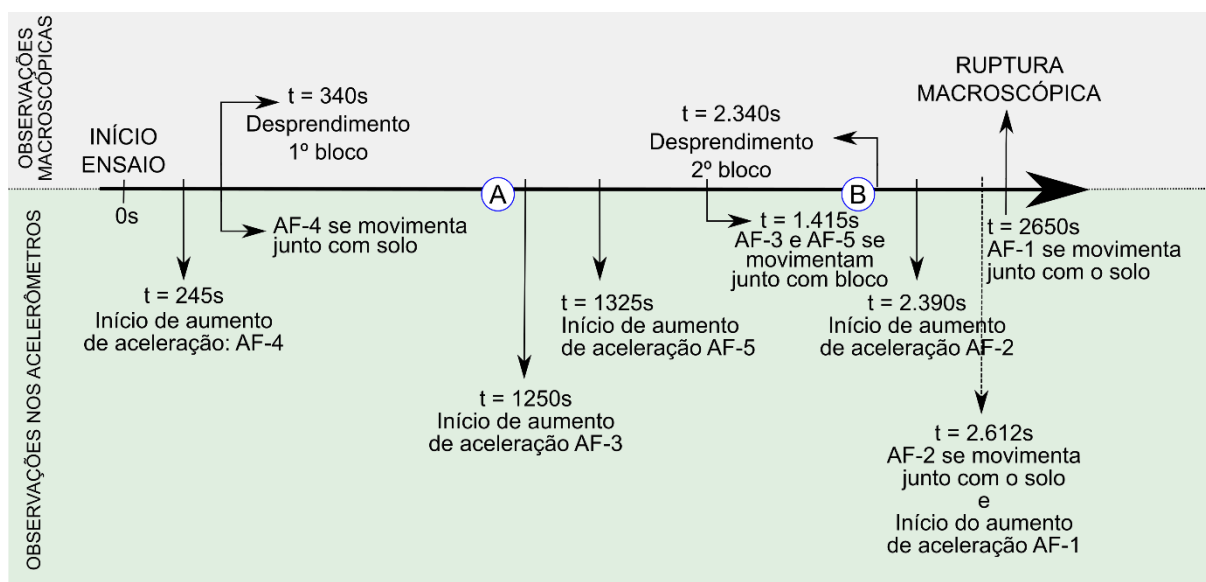


Figura 5.26: Ensaio 2 - molhado: sequência de eventos observados macroscopicamente e com os dados de aceleração. As letras A e B indicam os eventos de aumento de vazão.

5.2.6. Ensaio 2 – molhado: resultados do acelerômetro BF

A Figura 5.27 apresenta os resultados de aceleração medidos nas três componentes do acelerômetro BF-1, o qual estava localizado entre o terço inferior e o terço intermediário da caixa. No eixo vertical do gráfico é apresentada a aceleração em g e no horizontal, o tempo, em segundos. Nota-se que nos resultados de aceleração deste dispositivo, o desprendimento do primeiro bloco foi identificado entre 400s e 415s, diferindo do tempo identificado macroscopicamente e com os acelerômetros AF. Esta diferença ocorre porque o instante do início de aquisição de dados deste acelerômetro não estava totalmente sincronizado com o instante de início de aquisição dos acelerômetros AF.

Observa-se que nas componentes u e v , o incremento de aceleração antes do desprendimento do primeiro bloco se inicia aos 300s e o desprendimento ocorre aos 400s, enquanto na componente u' , o início do aumento da aceleração ocorre aos 380s e o desprendimento do bloco, aos 415s. Esta diferença é função do posicionamento dos eixos no espaço e do movimento deflagrado e mostra a importância de se trabalhar com três eixos de aceleração, uma vez que os sinais indicativos de ruptura podem ser medidos em instantes diferentes em cada eixo

Os resultados deste acelerômetro, em termos de tendência de comportamento, estão de acordo com os do acelerômetro AF-4, posicionado na mesma região da caixa de ensaio. O acelerômetro AF-4 detectou os sinais prévios ao desprendimento do bloco com 130s de antecedência e o BF-1, com 100s.

Isto evidencia a importância da frequência de aquisição utilizada para detectar sinais que antecedem a ruptura. No caso do BF-1, foi utilizada frequência de aquisição de 1Hz e nos AF, de 4.000Hz. Nota-se que ao utilizar uma frequência mais baixa, perdem-se sinais indicativos da ruptura e o tempo decorrido até a materialização da mesma pode ser subestimado.

No entanto, os acelerômetros de baixa frequência possuem três eixos, enquanto os de alta frequência têm dois. Observando os resultados coletados com o BF-1, verifica-se que na componente u' (componente que o acelerômetro biaxial não tem) foram medidos também sinais prévios à ruptura, em tempos diferentes às outras componentes. Sendo assim, existem sinais de aceleração que não foram medidos pelos acelerômetros biaxiais. Isto sugere que o uso de acelerômetros triaxiais pode contribuir a um melhor e mais detalhado entendimento do movimento de ruptura.

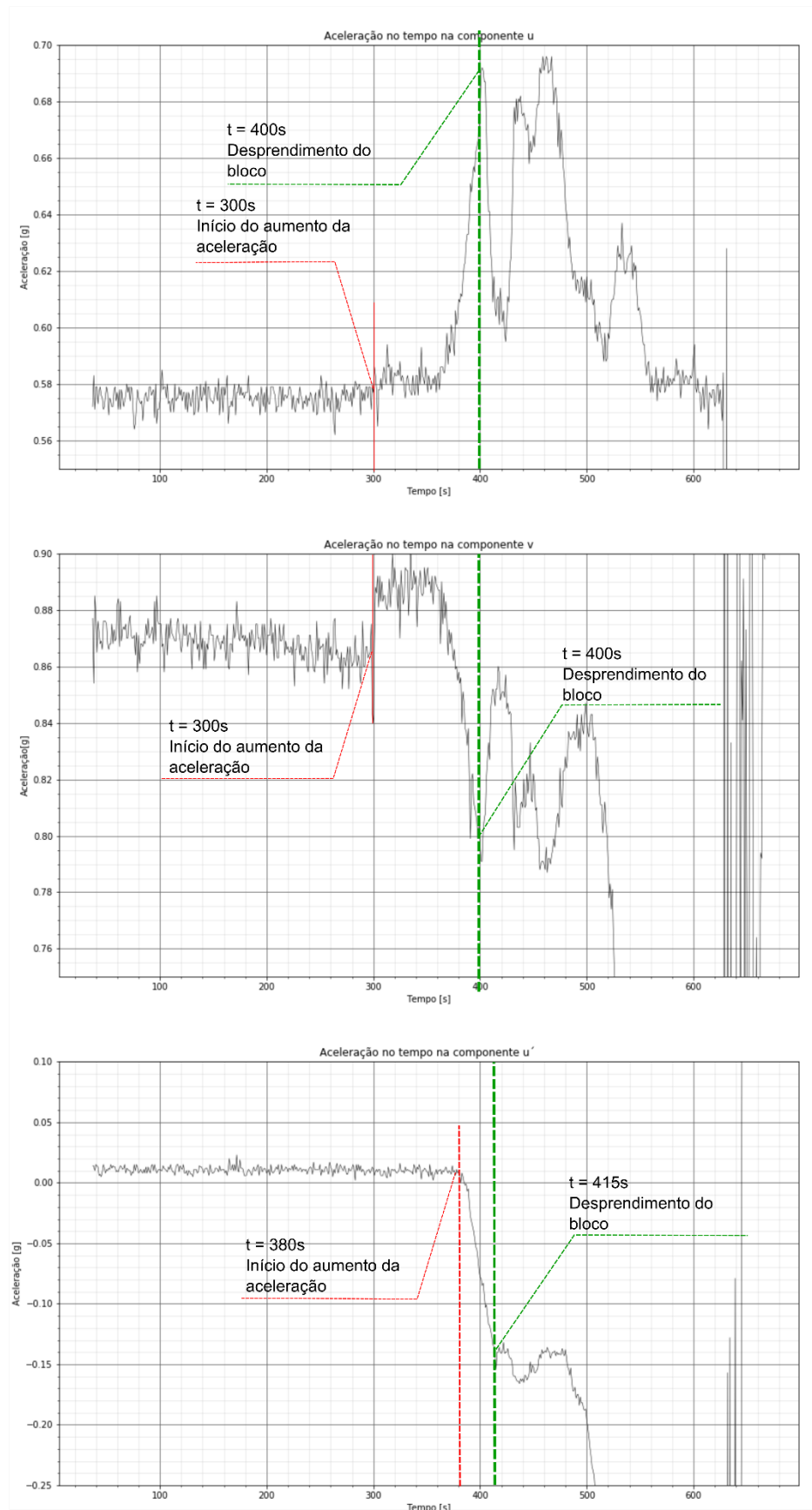


Figura 5.27: Ensaio 2 – molhado, BF-1: aceleração medida nas componentes u , u' e v . Dados brutos.

5.2.7. Ensaio 3 – molhado: observações macroscópicas

O terceiro ensaio foi realizado em condições molhadas, seguindo o procedimento de montagem do experimento descrito no item 4.4.2. Foram instalados cinco acelerômetros AF e dois acelerômetros BF no solo. De forma semelhante aos dois ensaios anteriores, um acelerômetro AF foi fixado na parede metálica externa da caixa com o objetivo de os dados coletados serem utilizados como referência de não movimentação do solo. A Figura 5.28 apresenta o posicionamento dos acelerômetros no Ensaio 3. Como no ensaio molhado anterior, os acelerômetros AF coletaram dados com frequência de 4.000Hz enquanto os BF, de 1Hz.

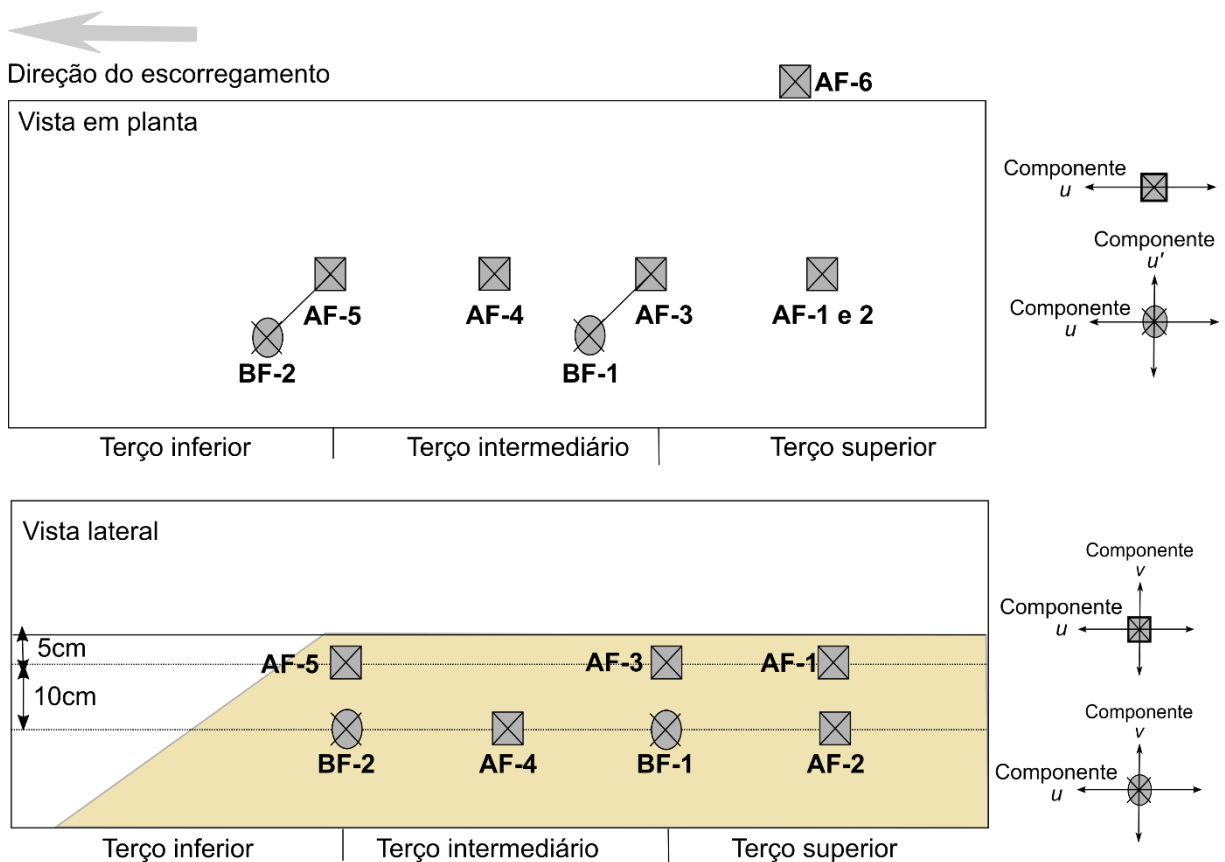


Figura 5.28: Ensaio 3 – molhado: posicionamento dos acelerômetros no ensaio e das componentes de aceleração no espaço.

Diferentemente do Ensaio 2, no Ensaio 3, após a instalação dos sensores, saturação do solo e construção do talude na base, a caixa foi imediatamente inclinada, portanto, não houve um intervalo de tempo de repouso no qual teria ocorrido a drenagem parcial do solo. Ao atingir 30° de inclinação, o fornecimento de água foi ligado e mantido com vazão constante de 4,4 L/min até ocorrer a ruptura total do solo.

Após 5s desde o início do ensaio, formou-se uma trinca no terço intermediário, próximo ao terço inferior. Aos 40s, uma segunda trinca se formou entre o terço intermediário e superior. O bloco definido por estas duas trincas começou a se desprender aos 45s. O desprendimento finalizou aos 65s e o bloco permaneceu no mesmo local até o momento da ruptura total, aos 81s. A

Figura 5.29 apresenta esquematicamente numa linha do tempo os eventos observados durante o ensaio e a Figura 5.30, a sequência de formação do bloco no terço intermediário.

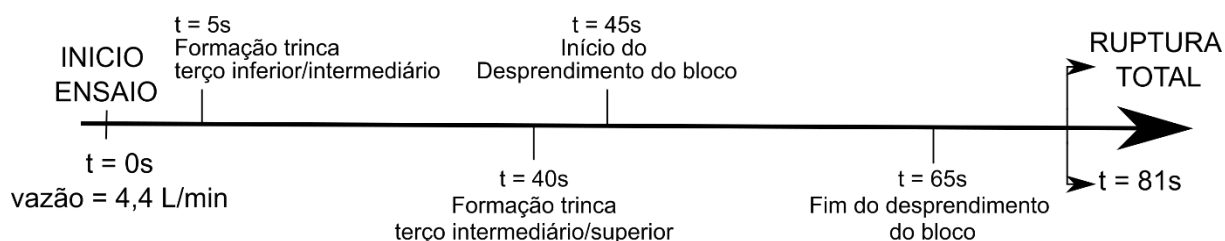


Figura 5.29: Ensaio 3 – molhado: linha do tempo dos eventos observados macroscopicamente durante o ensaio.

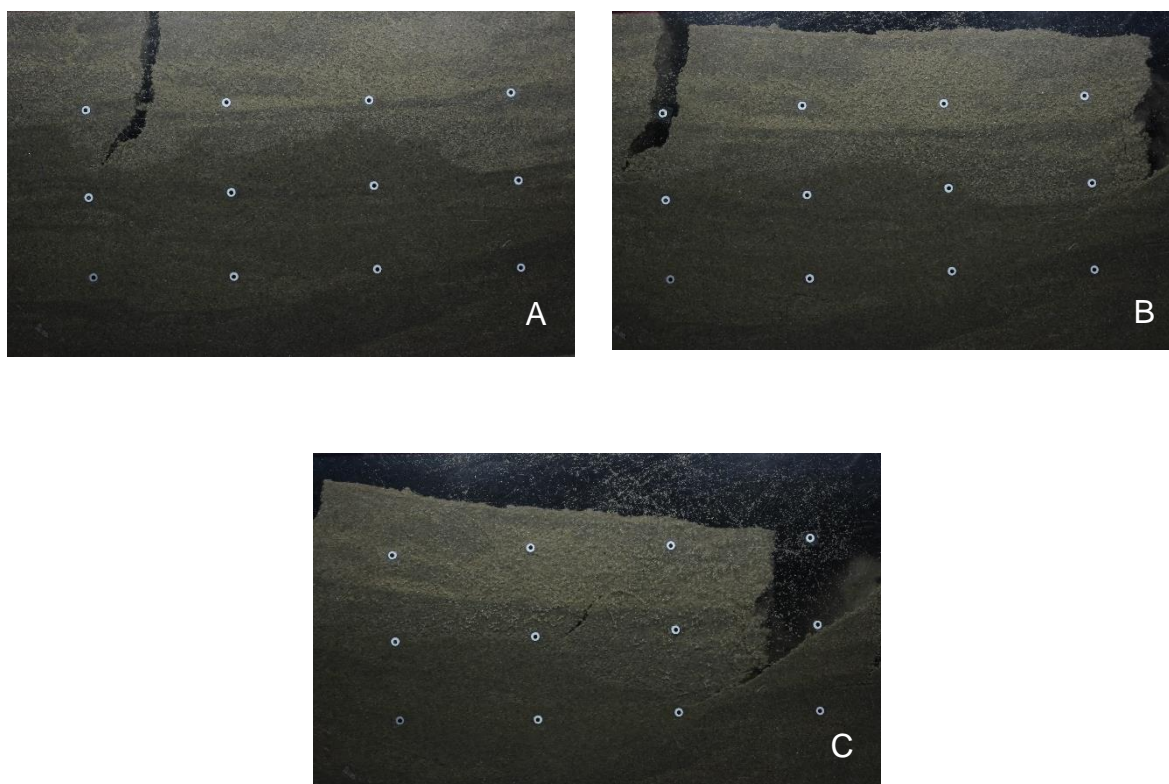


Figura 5.30: Sequência de fotos com o desprendimento do bloco localizado no terço intermediário. A) Vista aos 40s, antes do início do desprendimento; B) vista aos 45s, no início do desprendimento; C) vista aos 65s, quando o movimento de desprendimento cessa.

5.2.8. Ensaio 3 – molhado: resultados dos acelerômetros AF

As Figura 5.31 a Figura 5.35 apresentam os resultados de aceleração medidos nos acelerômetros posicionados dentro do solo (AF-1 a AF-5), no Ensaio 3, realizado em condições molhadas. No eixo vertical, apresenta-se a aceleração em g e no horizontal, o tempo, em segundos.

Nota-se que os acelerômetros AF-1 e AF-2 (Figura 5.31 e Figura 5.32), localizados no terço superior e o acelerômetro AF-5 (Figura 5.33), localizado no terço inferior, próximo ao talude escavado, apresentam um comportamento de aceleração semelhante entre si até o instante da ruptura, aos 81s. O acelerômetro AF-1 detectou o início do incremento da aceleração aos 15s e os AF-2 e AF-5, aos 5s.

Os acelerômetros AF-3 e AF-4 (Figura 5.34 e Figura 5.35), localizados no terço intermediário da caixa apresentam também comportamento semelhante entre si. O incremento da aceleração se inicia aos 5s, como nos AF-2 e AF-5, no entanto, no AF-3 observa-se um aumento pronunciado da aceleração aos 40s, o qual reflete o início do desprendimento do bloco. Esse aumento de aceleração cessa aos 52s, quando o bloco termina de se desprender.

O AF-4, por sua vez, apresenta o pico de aceleração referente ao desprendimento do bloco aos 50s. Chama a atenção o comportamento deste acelerômetro, o qual após atingir o pico de aceleração correspondente ao desprendimento do bloco, passa a registrar aceleração decrescente até próximo ao instante da ruptura macroscópica, quando apresenta novamente um padrão de aumento de aceleração. Neste sensor, as acelerações aumentam até ocorrer o desprendimento do bloco. Em seguida a aceleração diminui, pois localmente este volume de solo não está se movimentando tanto, apesar de o “talude” como um todo estar caminhando para a ruptura.

Este comportamento reforça a importância de se utilizar uma rede de nós sensores para o monitoramento de encostas e de se analisarem as respostas dos diversos sensores de forma integrada. Ele também evidencia que a diminuição das acelerações não implica necessariamente em estabilização da encosta e que os movimentos do solo que antecedem a ocorrência de um movimento de massa são de fato muito mais complexos do que as observações macroscópicas nos permitem inferir.

Se compararmos, ainda, os registros de acelerômetros AF instalados em uma mesma posição no terço superior, mas com profundidades diferentes, como o caso do AF-1 e AF-2, podemos verificar que os sensores foram capazes de registrar as variações na

progressão do movimento em diferentes profundidades. Enquanto o AF-1, posicionado mais próximo à superfície identificou os primeiros sinais de aumento de aceleração aos 15s, o AF-2 identificou aos 5s. Essas variações de aceleração na mesma região não foram observadas macroscopicamente e mostram que nesta região, o solo se instabilizou em profundidades maiores antes do que em profundidades próximas à superfície, sem a formação de trincas, como no terço inferior e intermediário. A resposta destes dois acelerômetros indica que movimentos podem acontecer sem haver indícios macroscópicos em superfície ou mesmo na janela lateral de observação da simulação.

Os resultados dos acelerômetros AF permitem ter uma maior compreensão sobre a deflagração e evolução do escorregamento simulado antes que os fenômenos macroscópicos se materializem. O escorregamento se iniciou aos 5s, instante no qual os acelerômetros AF-2, AF-3, AF-4 e AF-5 começaram a medir incrementos de aceleração. O acelerômetro AF-1 detectou o início do incremento da aceleração aos 15s. Os AF-3 e AF-4, posicionados no local onde se desprende um bloco, mostraram a evolução de início e desprendimento total do bloco, o qual permaneceu em repouso até o instante da ruptura macroscópica. A ruptura macroscópica foi identificada em todos os acelerômetros ao mesmo tempo, aos 81s.

5.2.9. Ensaio 3 – molhado: resultados dos acelerômetros BF

As Figura 5.36 e Figura 5.37 apresentam os resultados de aceleração medidos nos acelerômetros BF, nas três componentes de aceleração (u , v e u'). No eixo vertical, apresenta-se a aceleração em g e no horizontal, o tempo, em segundos. Nota-se que ambos acelerômetros identificaram o momento da ruptura, aos 81s, de acordo com o observado nos acelerômetros de alta frequência e nas observações macroscópicas.

O acelerômetro BF-1 (Figura 5.36), posicionado no terço superior da caixa, começou a medir incrementos na aceleração a partir dos 33s, nas três componentes. Já, o acelerômetro BF-2 (Figura 5.37), posicionado no terço inferior, não identificou sinais de aumento de aceleração prévios à ruptura macroscópica.

A tendência de aumento de aceleração observada no BF-1 é semelhante à observada nos acelerômetros de alta frequência AF-1 e AF-2, posicionados na mesma região. Porém, observa-se que o intervalo de tempo decorrido entre a identificação do início do aumento de aceleração e a ruptura macroscópica varia consideravelmente entre os acelerômetros de baixa e alta frequência. O acelerômetro BF-1 detectou os sinais prévios com 48s de antecedência, enquanto os acelerômetros de alta frequência detectaram com 66s (AF-1)

e 76s (AF-2). Corroborando os resultados obtidos no Ensaio 2, no Ensaio 3 a diminuição da frequência de aquisição também mostra que ocorre perda de identificação de sinais antecipados de ruptura.

Com relação à frequência de aquisição, ainda, o acelerômetro BF-2 não detectou nenhum sinal prévio de ruptura enquanto o acelerômetro AF-5, posicionado na mesma região que o BF-2, detectou sinais prévios com 76s de antecedência. Nota-se que a variação de aceleração medida pelo AF-5 no intervalo de tempo entre o início do aumento da aceleração e o rompimento é de 0,86 a 0,88g. Por ser uma variação relativamente sutil de aceleração, ao utilizar uma frequência de aquisição mais baixa com o BF-2, essa variação não foi detectada.

Entretanto, os acelerômetros de baixa frequência utilizados têm a vantagem de medir a aceleração em três eixos. Na Figura 5.36 observa-se que os sinais prévios à ruptura foram também identificados na componente u' , a qual não está presente nos acelerômetros de alta frequência, o que mostra, por sua vez, que há componentes de aceleração em outra direção que não foram medidas pelos acelerômetros de alta frequência. Portanto, o uso de acelerômetros triaxiais permite ter um maior e mais detalhado conhecimento do mecanismo de ruptura envolvido.

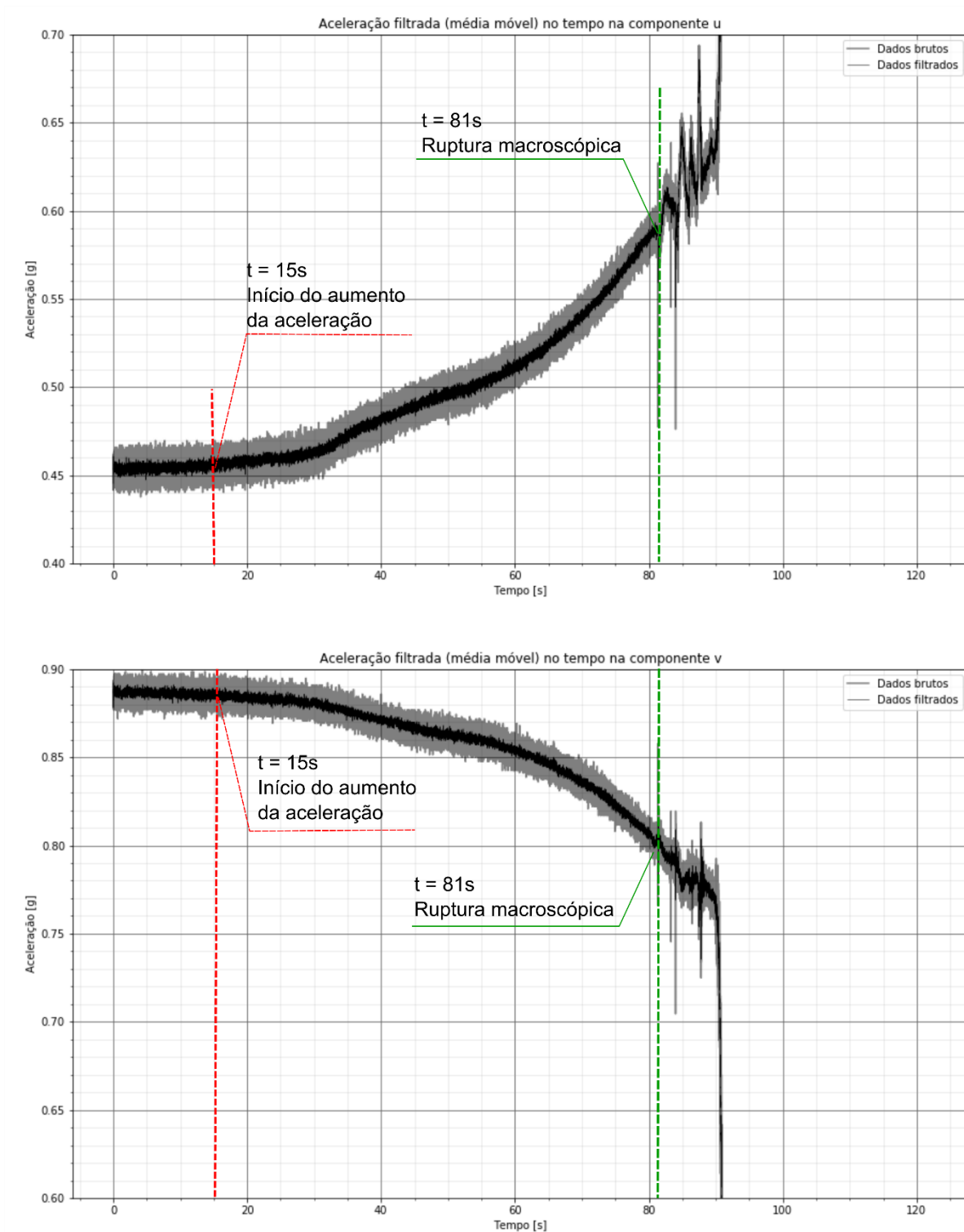


Figura 5.31: Ensaio 3 – molhado, AF-1: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrado com média móvel, em preto.

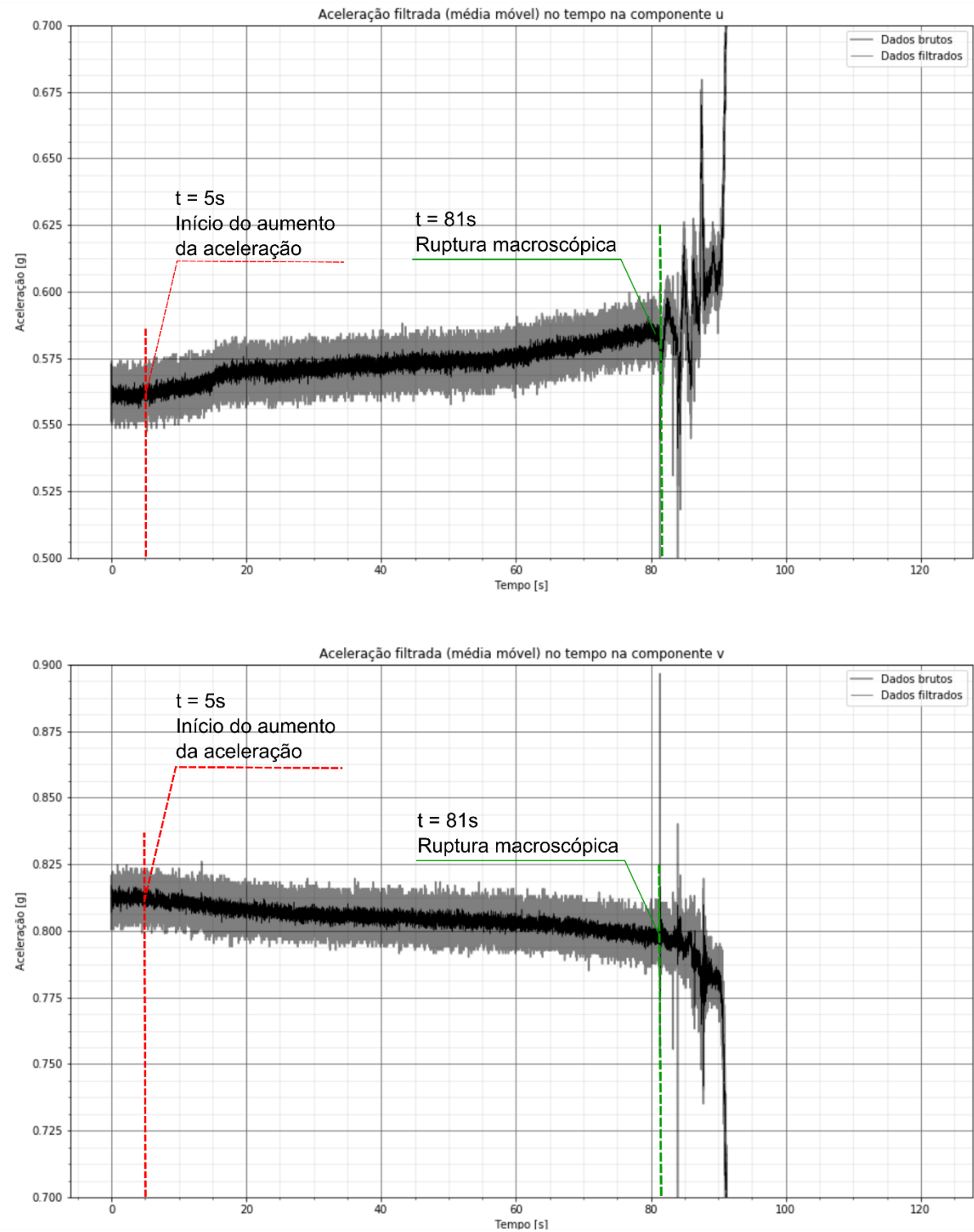


Figura 5.32: Ensaio 3 – molhado, AF-2: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrado com média móvel, em preto.

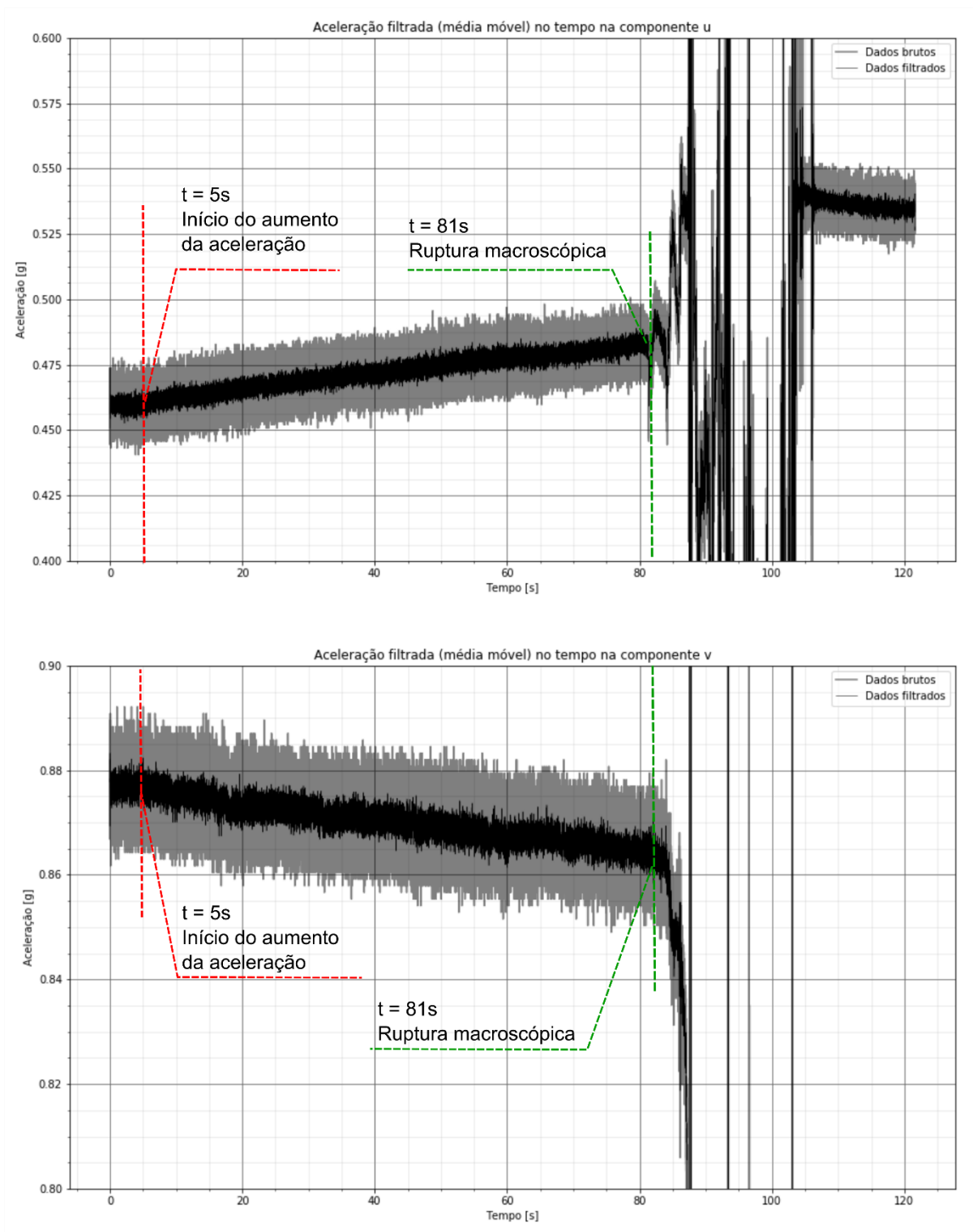


Figura 5.33: Ensaio 3 – molhado, AF-5: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrado com média móvel, em preto.

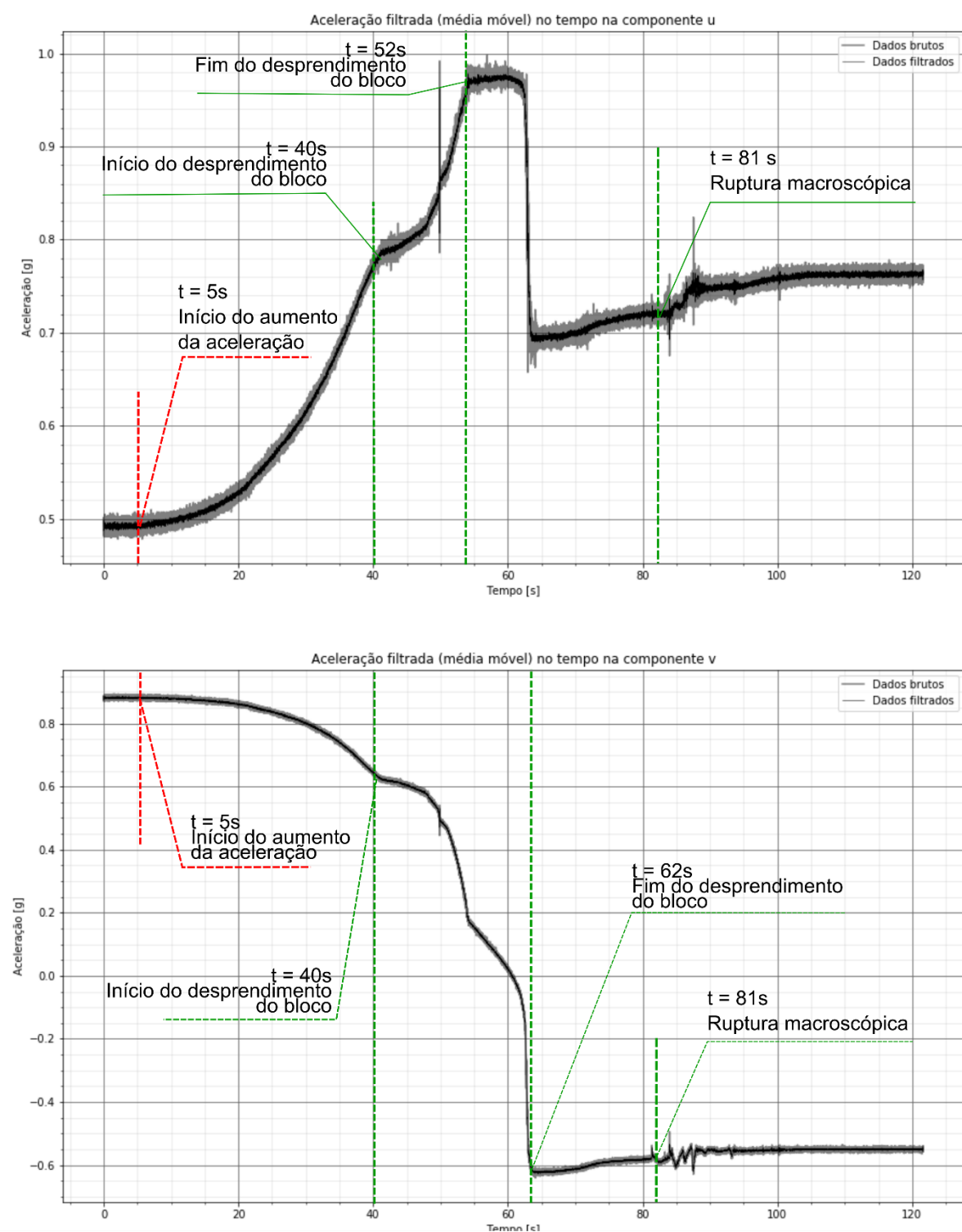


Figura 5.34: Ensaio 3 – molhado, AF-3: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrado com média móvel, em preto.

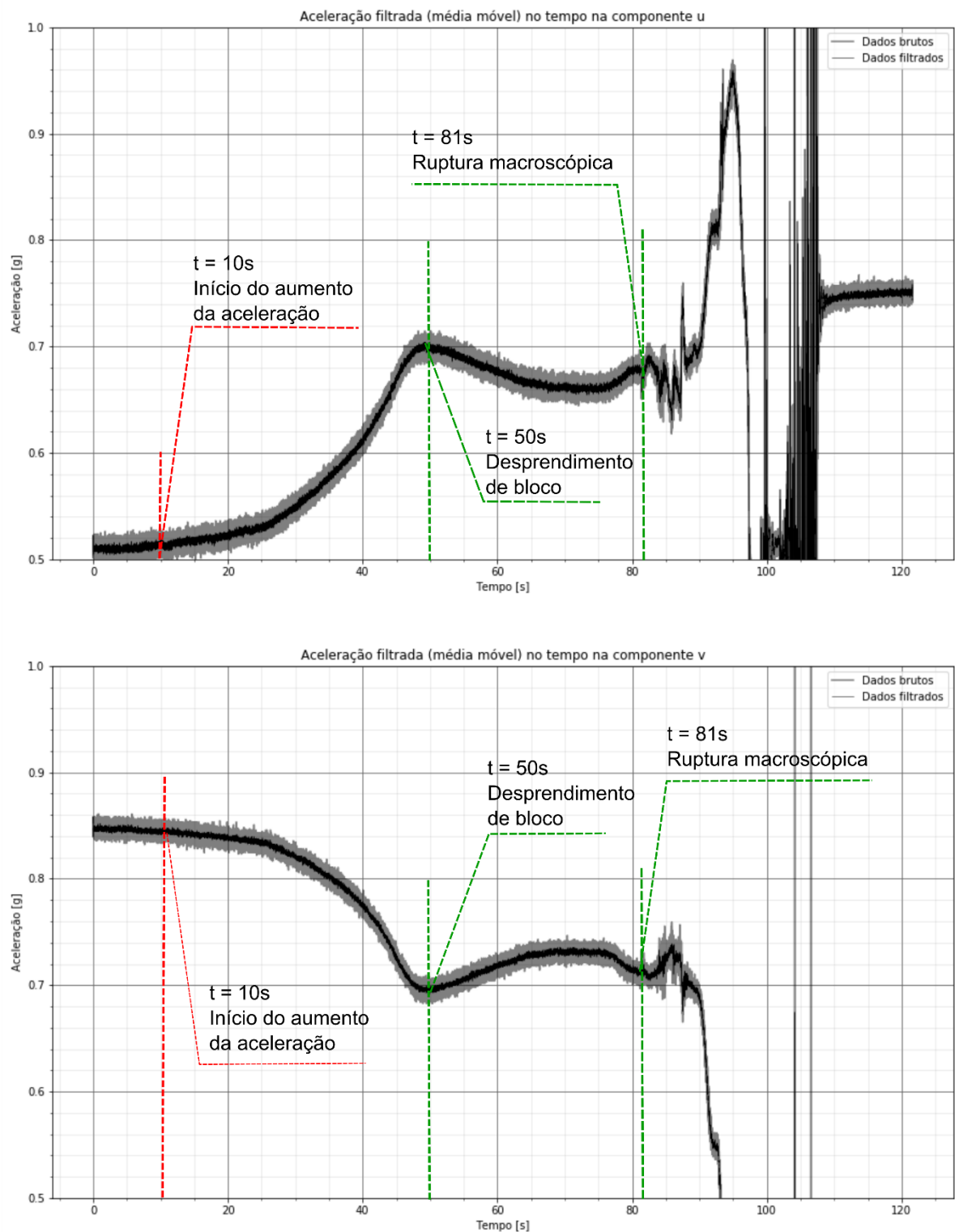


Figura 5.35: Ensaio 3 – molhado, AF-4: aceleração medida nas componentes u e v . Dados brutos em cinza e filtrado com média móvel, em preto.

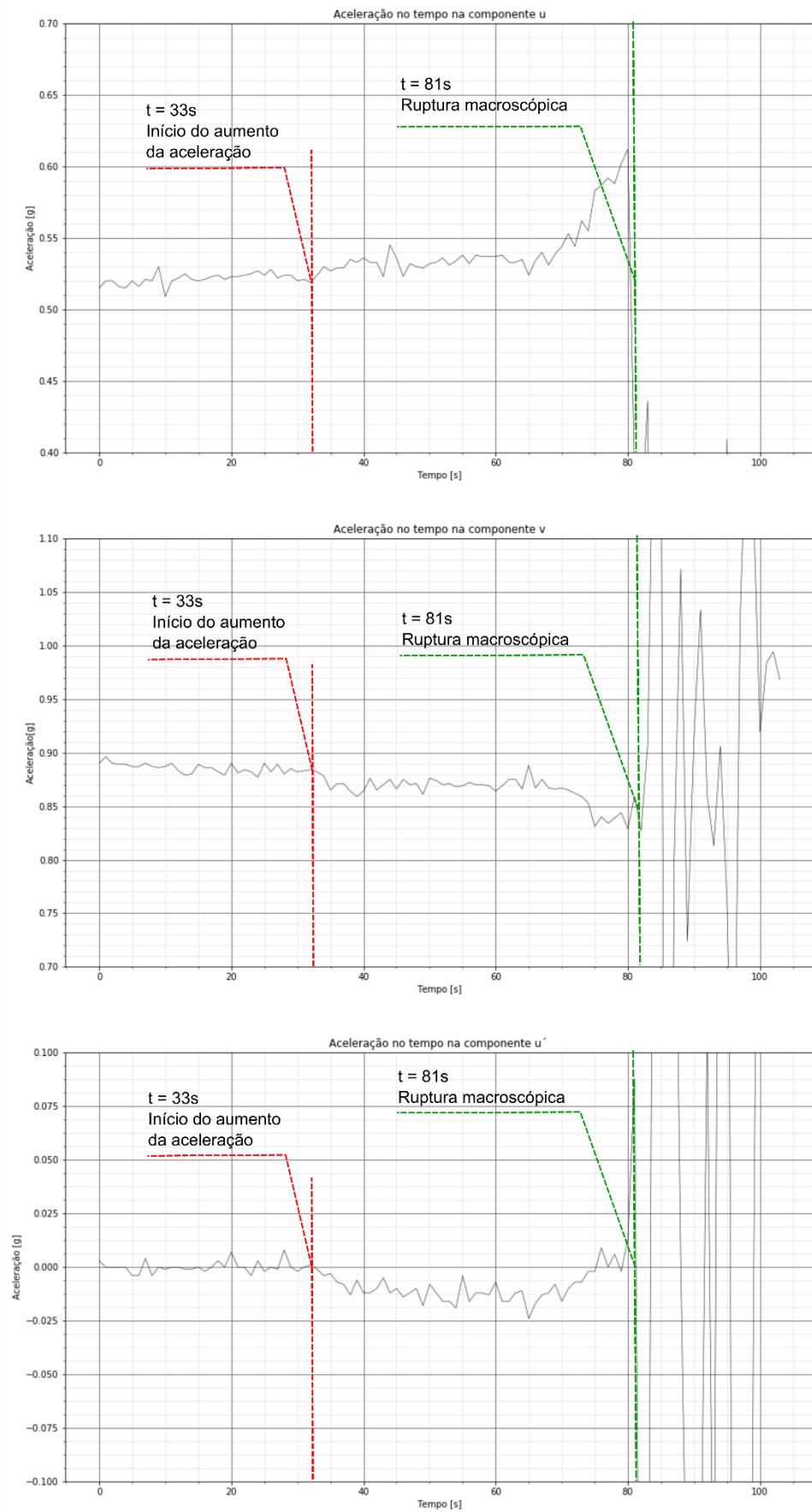


Figura 5.36: Ensaio 3 – molhado, BF-1: aceleração medida nas componentes u , u' e v . Dados brutos.

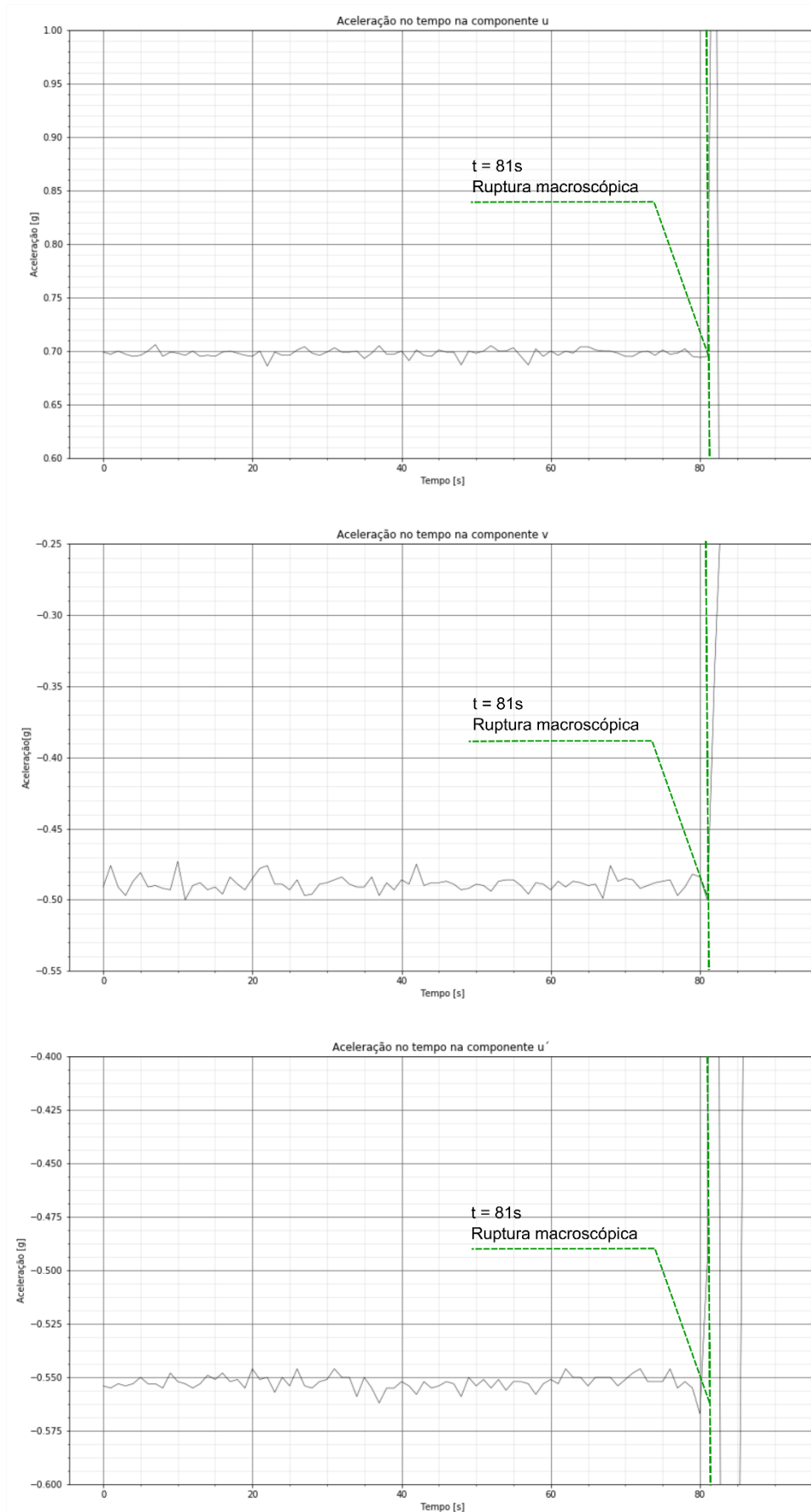


Figura 5.37: Ensaio 3 – molhado, BF-2: aceleração medida nas componentes u , u' e v . Dados brutos.

6. RESULTADOS DOS CÁLCULOS DE VELOCIDADE

Com o procedimento descrito no item 4.5 foram calculadas as velocidades para os dois ensaios molhados, com os dados de aceleração dos acelerômetros de alta frequência.

6.1. Ensaio 2 – molhado

As Figura 6.1 a Figura 6.5 apresentam os gráficos de velocidades calculadas no Ensaio 2 – molhado. No eixo vertical é apresentada a velocidade, em m/s, e no eixo horizontal, o tempo, em segundos. Como explicado no item 4.5, o cálculo desenvolvido para estimar velocidade a partir de dados de aceleração é válido somente no intervalo de tempo anterior à ruptura. Por este motivo, os gráficos são apresentados até o instante da ruptura. No caso dos acelerômetros AF-3 e AF-4, os quais estavam posicionados em blocos que se desprenderam durante o ensaio, a velocidade é mostrada até o desprendimento do bloco, devido a que depois do desprendimento do bloco, os acelerômetros podem ter sofrido ou estar mais sujeitos a movimentos de rotação, que não são considerados e invalidam o procedimento de cálculo desenvolvido.

De modo geral, observa-se que a tendência de aumento de velocidade de todos os acelerômetros é similar à tendência de aumento de aceleração, apresentada anteriormente nas figuras Figura 5.16 a Figura 5.25. Esta tendência de aumento de velocidades que culmina na ruptura é a base de muitos métodos propostos para previsão do momento da ruptura de taludes e estabelecimento de sistemas de alerta, como aquele preconizado por Fukuono (1985) e amplamente utilizado conforme mostra a literatura internacional.

Assim como nos gráficos de aceleração, nota-se que nos acelerômetros AF-1, AF-2, AF-3 e AF-5 o aumento de velocidade ocorre dois minutos após o aumento da vazão, sugerindo existir uma interação muito próxima entre a variação de água e a taxa de movimentação do solo (aceleração e velocidade), conforme defendido por Askarinejad *et al.* (2018) e observado por Godois (2011) em escala real em campo.

A Tabela 6.1 apresenta as velocidades máximas calculadas para cada acelerômetro, em cada componente. De acordo com Hungr *et al.* (2014), conforme apresentado no item 3.1, o movimento simulado no Ensaio 2 é classificado como um movimento rápido a muito rápido.

Tabela 6.1: Ensaio 2 – molhado: velocidade máximas calculadas em cada componente de cada acelerômetro

Acelerômetro	Velocidade máxima em u (m/s)	Velocidade máxima em v (m/s)
AF-1	0,01	0,01
AF-2	0,002	0,0015
AF-3	0,003	0,002
AF-4	0,005	0,005
AF-5	0,01	0,01

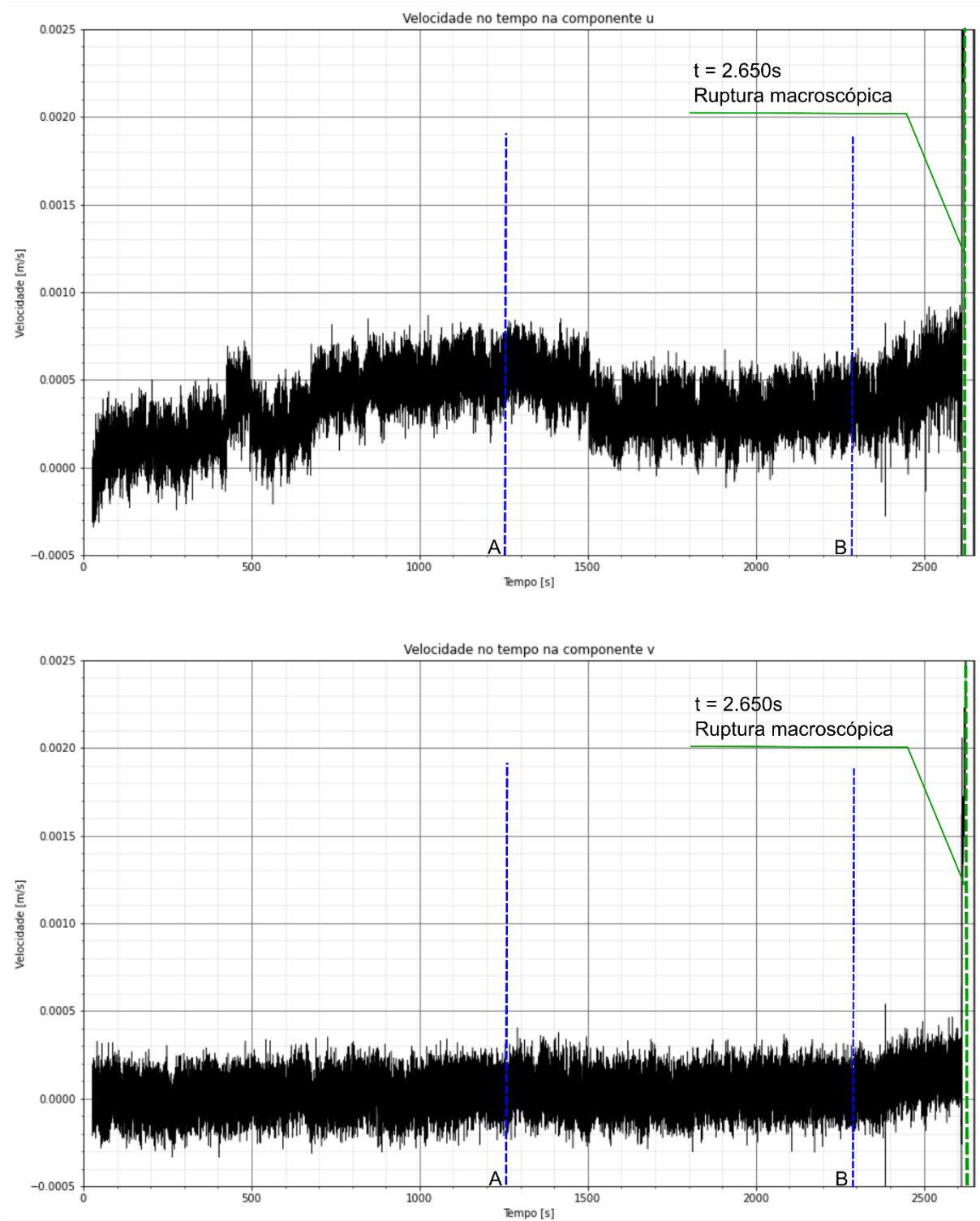


Figura 6.1: Ensaio 2 – molhado, AF-1: velocidades calculadas nas componentes u e v . As letras A e B indicam os instantes em que foi realizado o aumento de vazão.

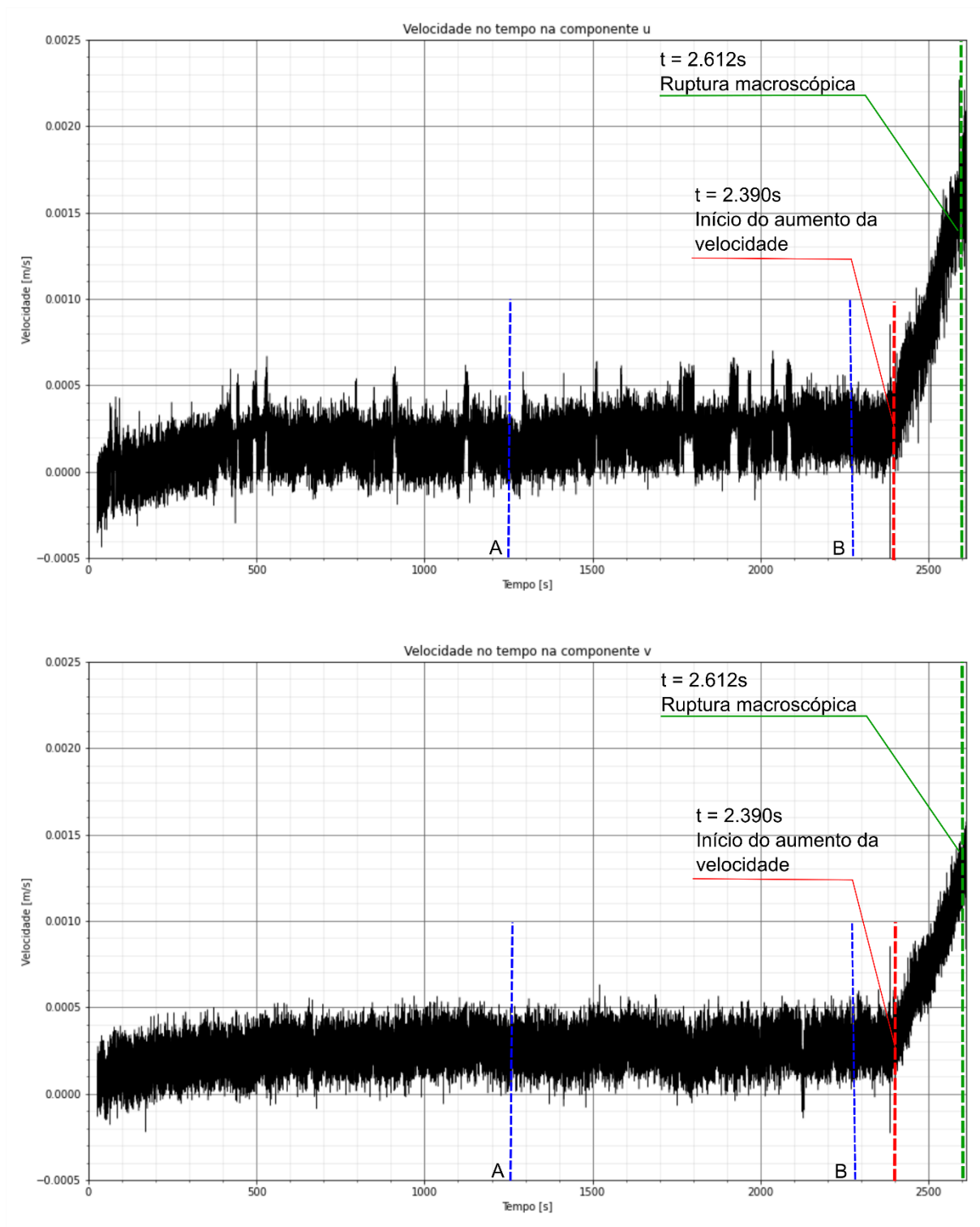


Figura 6.2: Ensaio 2 – molhado, AF-2: velocidades calculadas nas componentes u e v . As letras A e B indicam os instantes em que foi realizado o aumento de vazão.

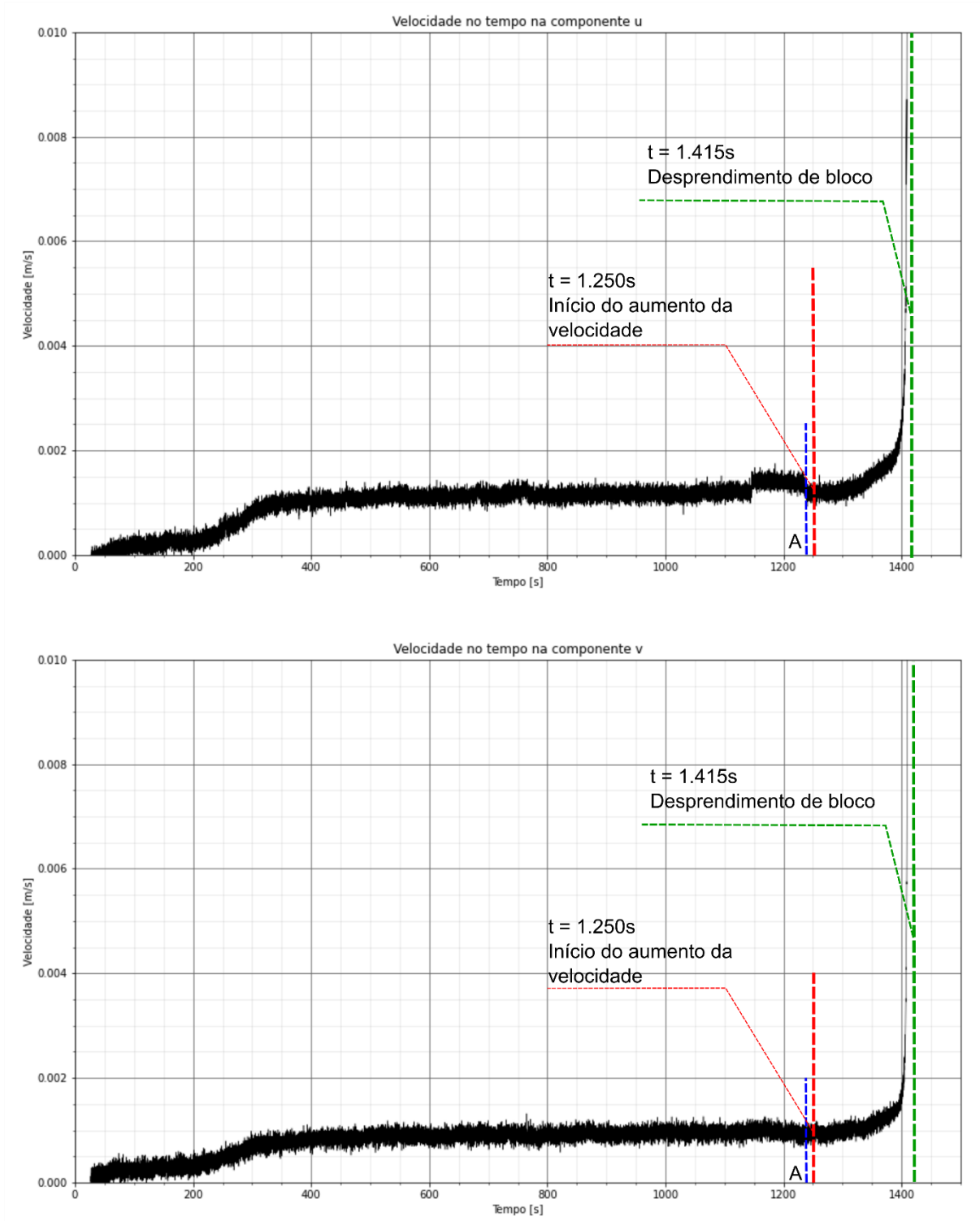


Figura 6.3: Ensaio 2 – molhado, AF-3: velocidades calculadas nas componentes u e v . A letra A indica o instante em que foi realizado o aumento de vazão.

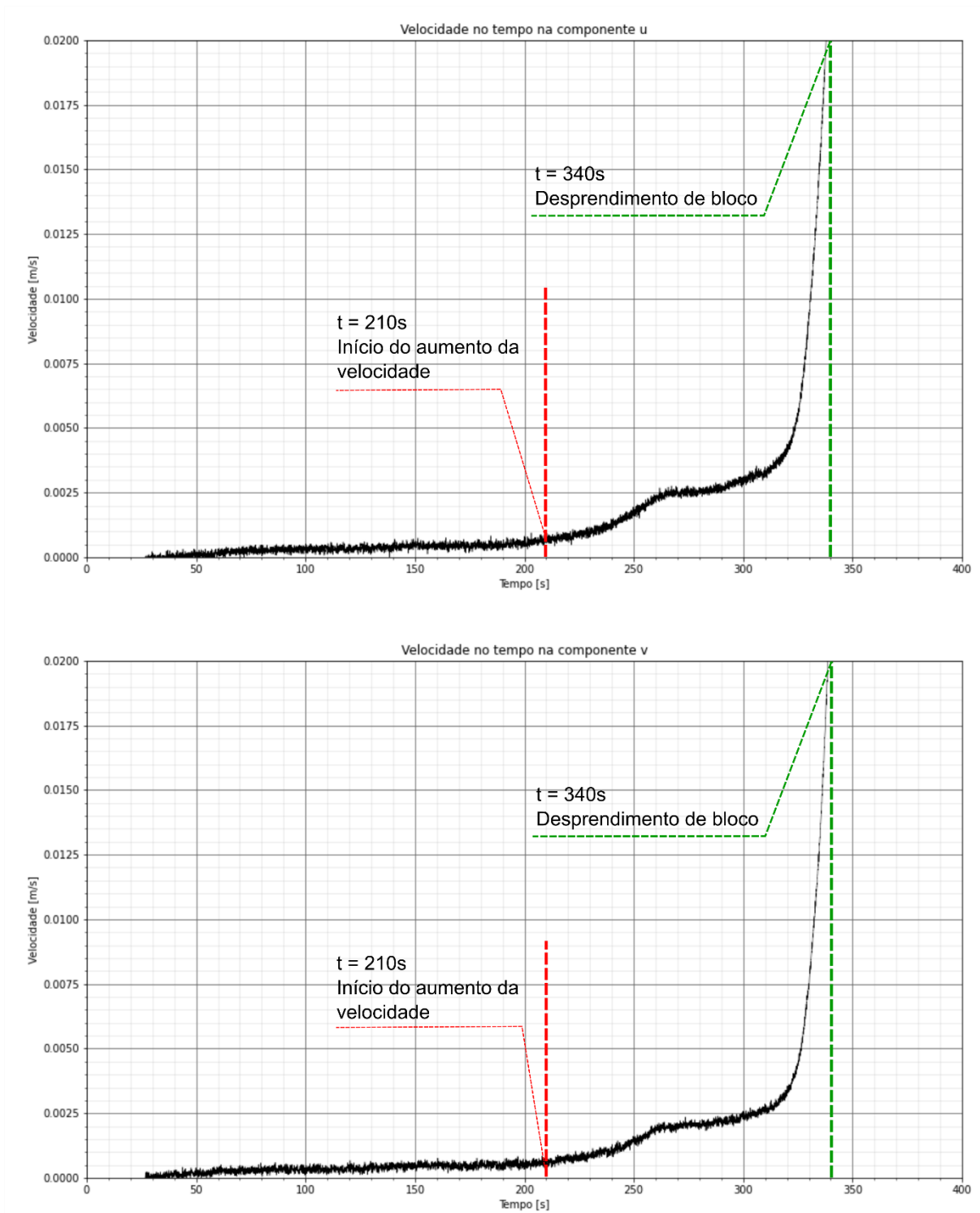


Figura 6.4: Ensaio 2 – molhado, AF-4: velocidades calculadas nas componentes u e v .

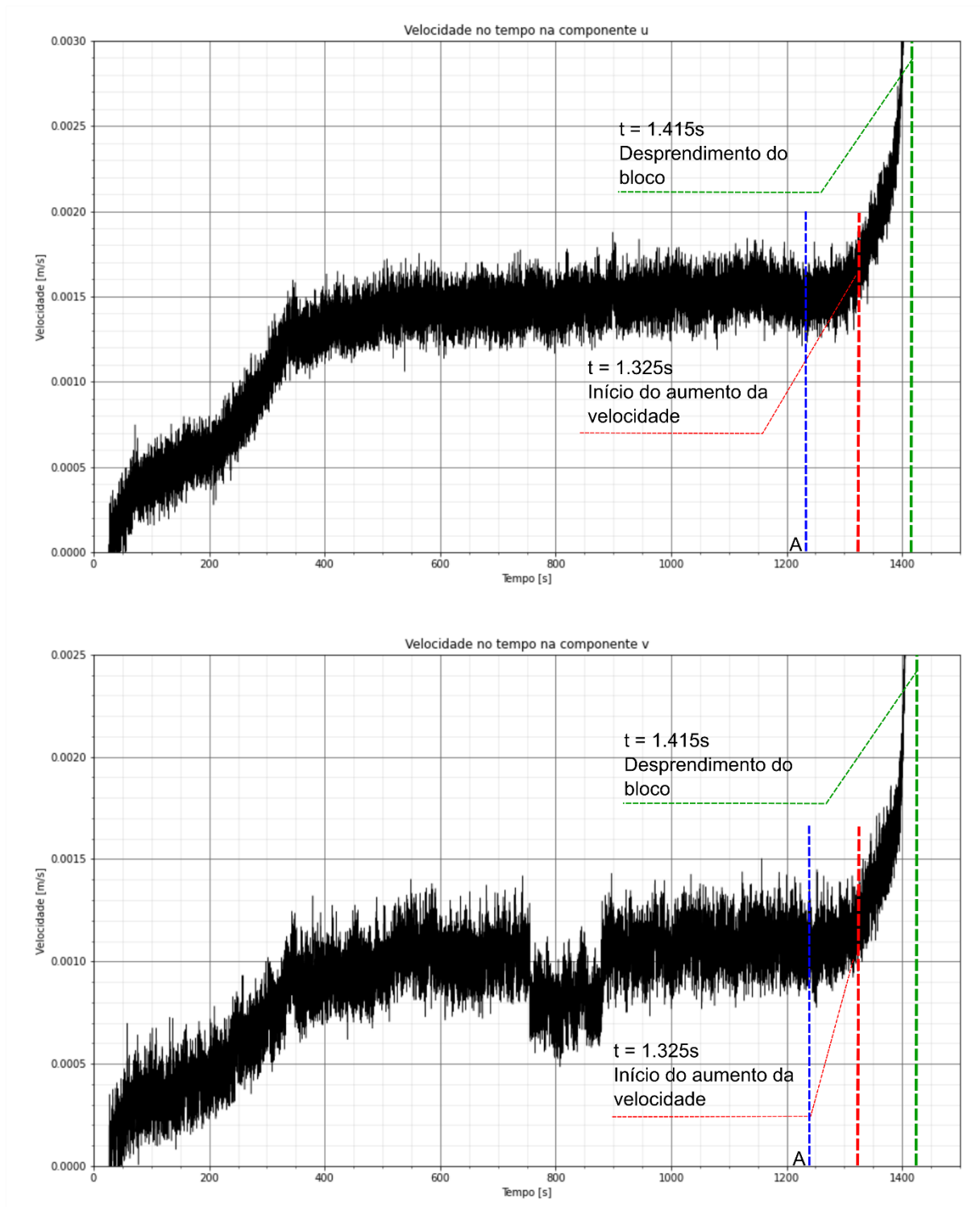


Figura 6.5: Ensaio 2 – molhado, AF-5: velocidades calculadas nas componentes u e v . A letra A indica o instante em que foi realizado o aumento de vazão.

6.2. Ensaio 3 – molhado

As Figura 6.6 a Figura 6.10 apresentam os gráficos de velocidades calculadas no Ensaio 3 – molhado. No eixo vertical é apresentada a velocidade, em m/s, e no eixo horizontal, o tempo, em segundos (s). Como explicado no item 4.5, o cálculo desenvolvido para estimar velocidade a partir de dados de aceleração é válido somente no intervalo de tempo anterior à ruptura. Por este motivo, os gráficos são apresentados até o instante da ruptura. No caso dos acelerômetros AF-3 e AF-4, os quais estavam posicionados no bloco que se desprende durante o ensaio, a velocidade é válida até o desprendimento do bloco, devido a que depois do desprendimento do bloco, os acelerômetros podem ter sofrido ou estar mais sujeitos a movimentos de rotação, que não são considerados e invalidam o procedimento de cálculo desenvolvido.

Os resultados obtidos no cálculo de velocidade dos acelerômetros deste ensaio são similares aos obtidos no Ensaio 2: a tendência de aumento de velocidade em todos os acelerômetros é semelhante à tendência de aumento de aceleração que leva a ruptura macroscópica. Aqui também há, no geral, tendência de aumento de velocidades, culminando na ruptura.

A Tabela 6.2 apresenta as velocidades máximas calculadas para cada acelerômetro, em cada componente. De acordo com Hungr *et al.* (2014), conforme descrito no item 3.1, o movimento simulado neste ensaio é classificado como rápido a muito rápido. Nota-se que as maiores velocidades foram calculadas nos acelerômetros AF-3 e AF-4, os quais apresentaram comportamento diferente aos demais por estarem localizados dentro do bloco que se desprende antes da ruptura global.

Tabela 6.2: Ensaio 3 – molhado: velocidade máximas calculadas em cada componente de cada acelerômetro

Acelerômetro	Velocidade máxima em u (m/s)	Velocidade máxima em v (m/s)
AF-1	0,017	0,010
AF-2	0,0034	0,0016
AF-3	0,036	0,025
AF-4	0,023	0,018
AF-5	0,0034	0,0018

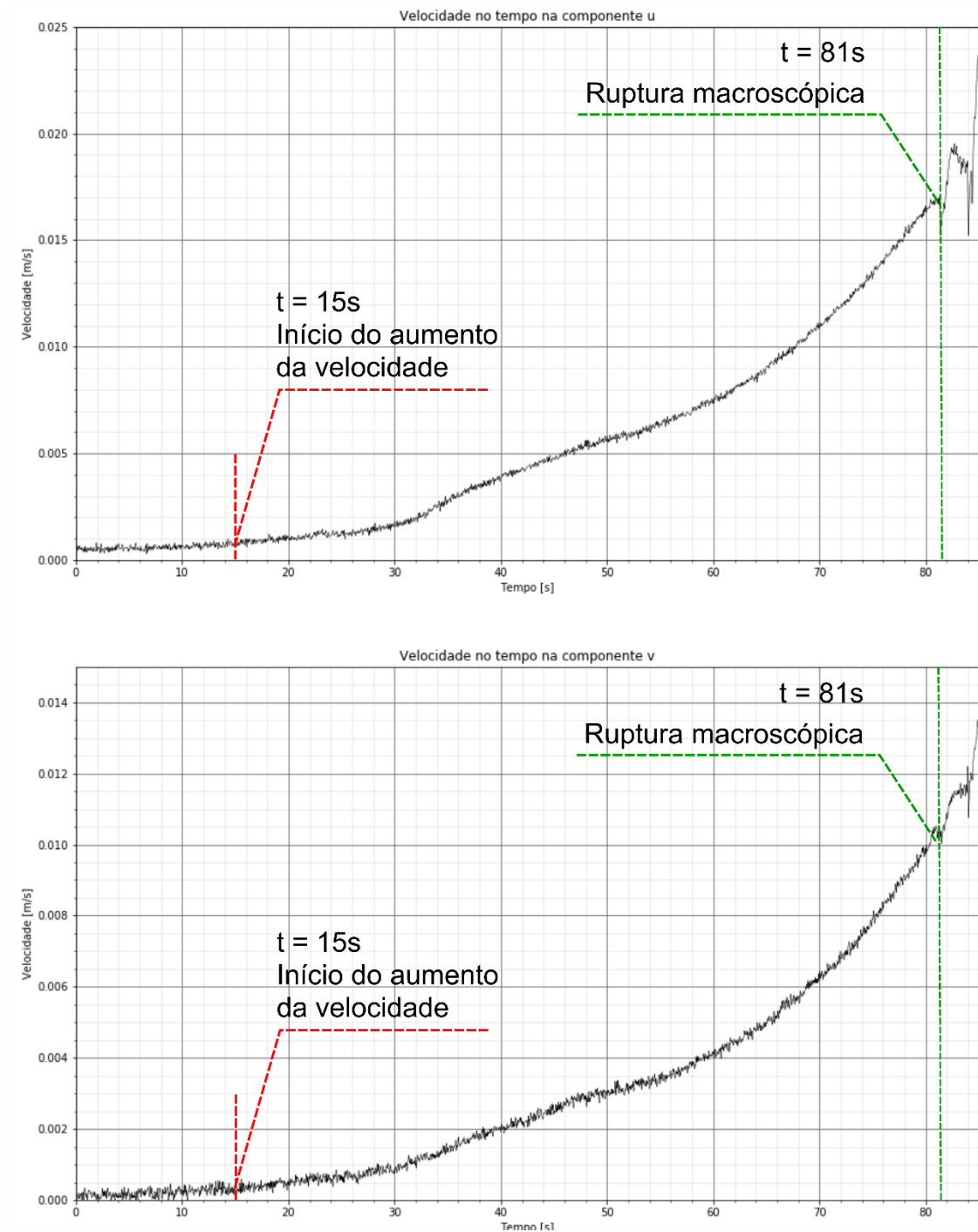


Figura 6.6: Ensaio 3 – molhado, AF-1: velocidades calculadas nas componentes u e v .

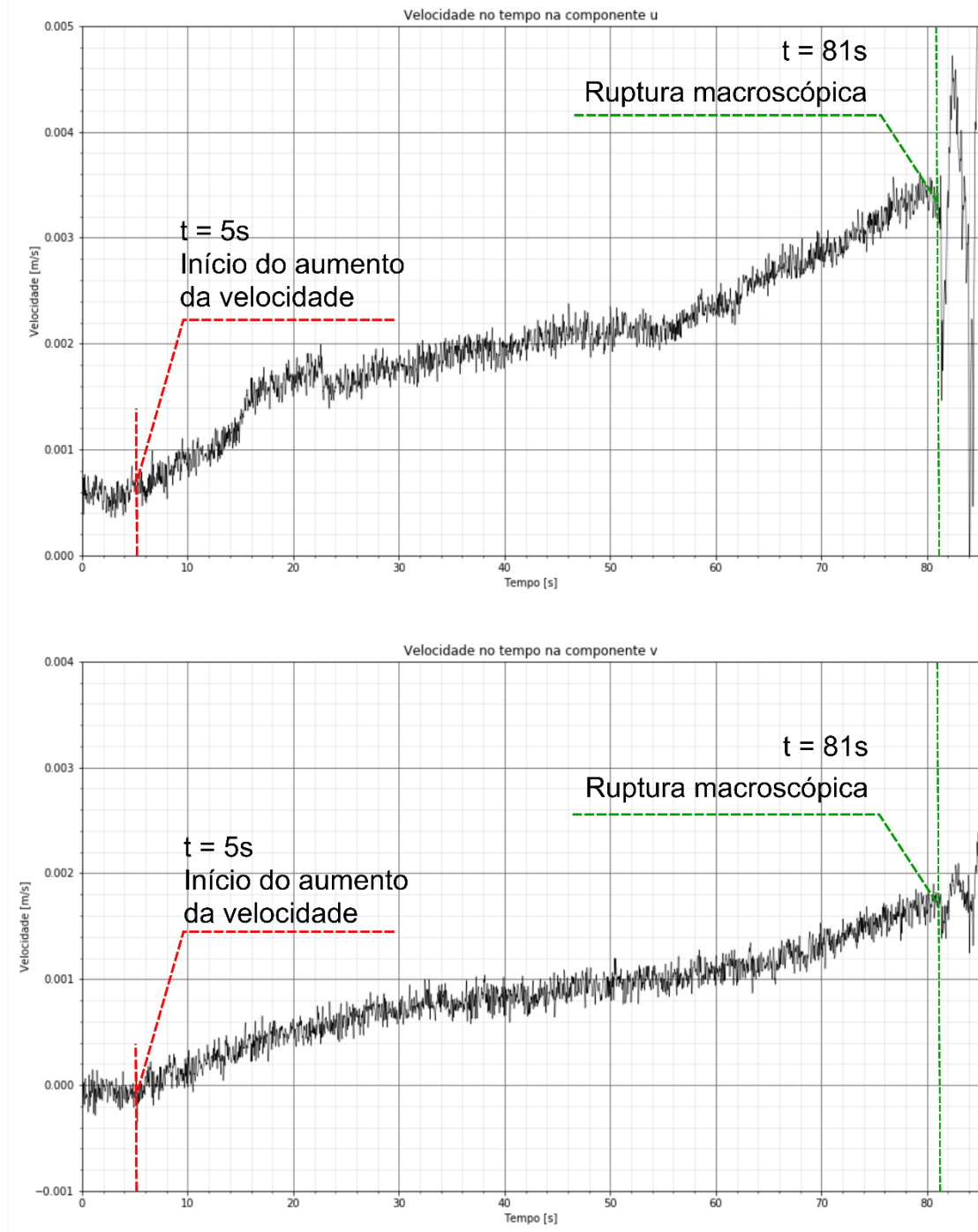


Figura 6.7: Ensaio 3 – molhado, AF-2: velocidades calculadas nas componentes u e v .

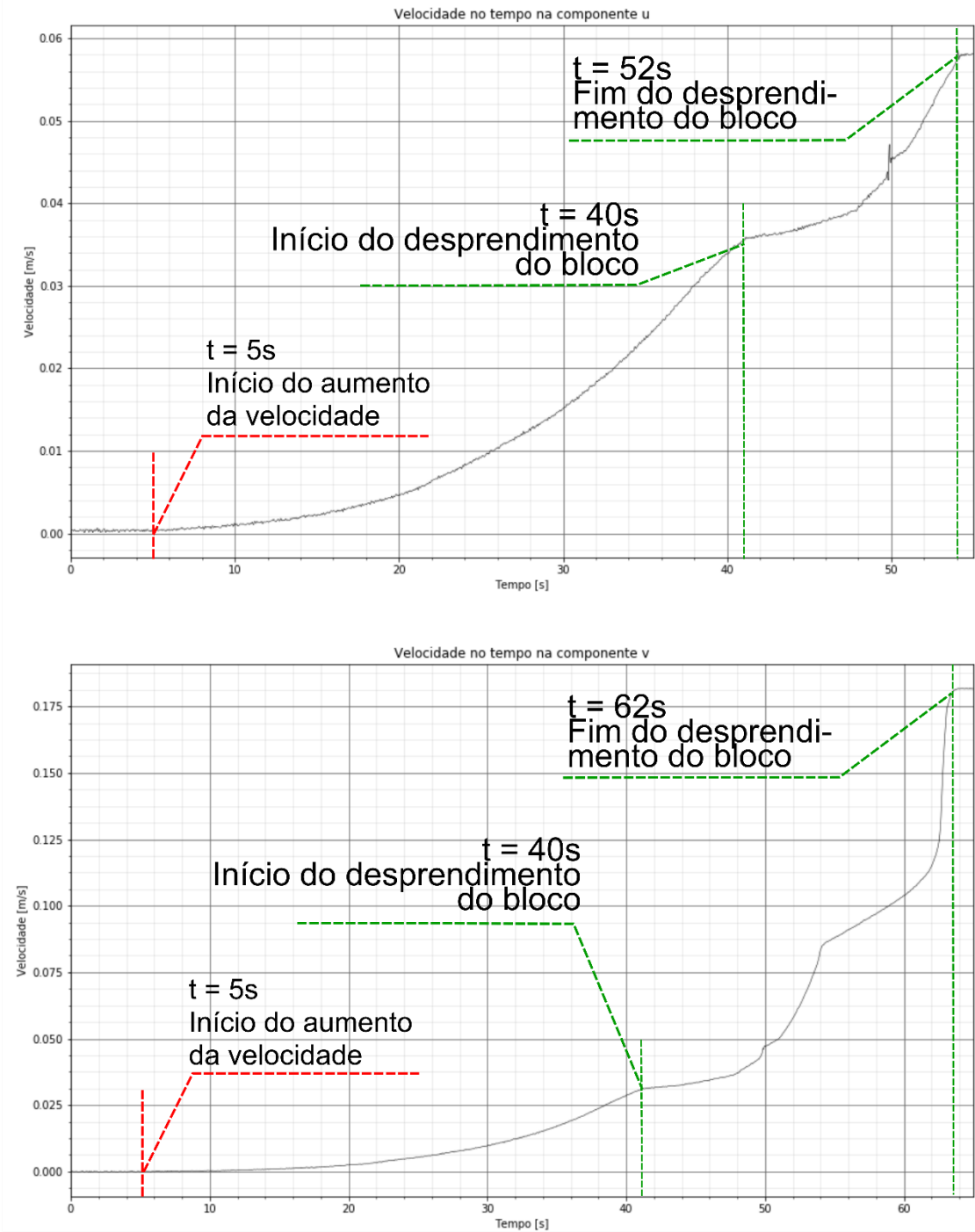


Figura 6.8: Ensaio 3 – molhado, AF-3: velocidades calculadas nas componentes u e v .

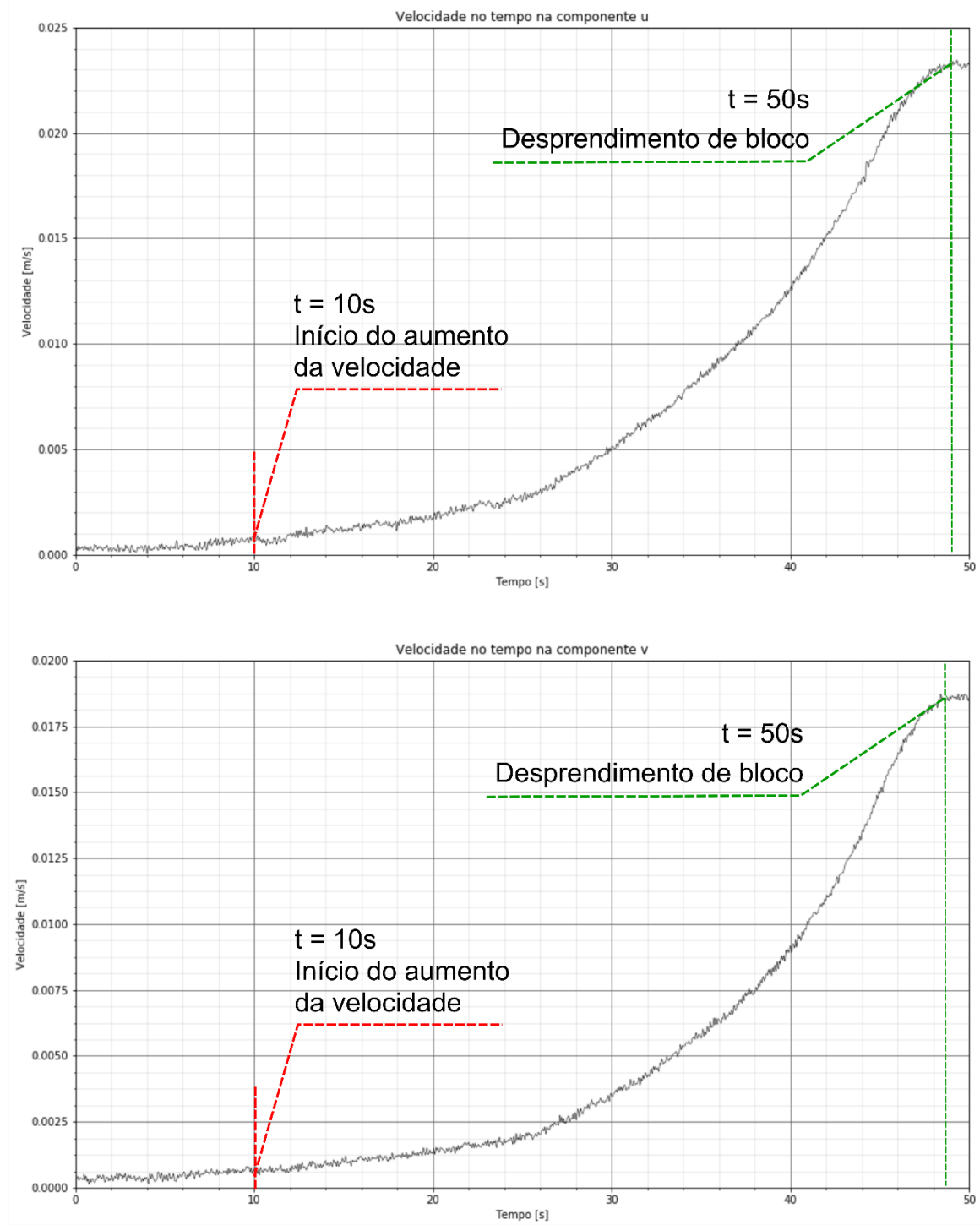


Figura 6.9: Ensaio 3 – molhado, AF-4: velocidades calculadas nas componentes u e v .

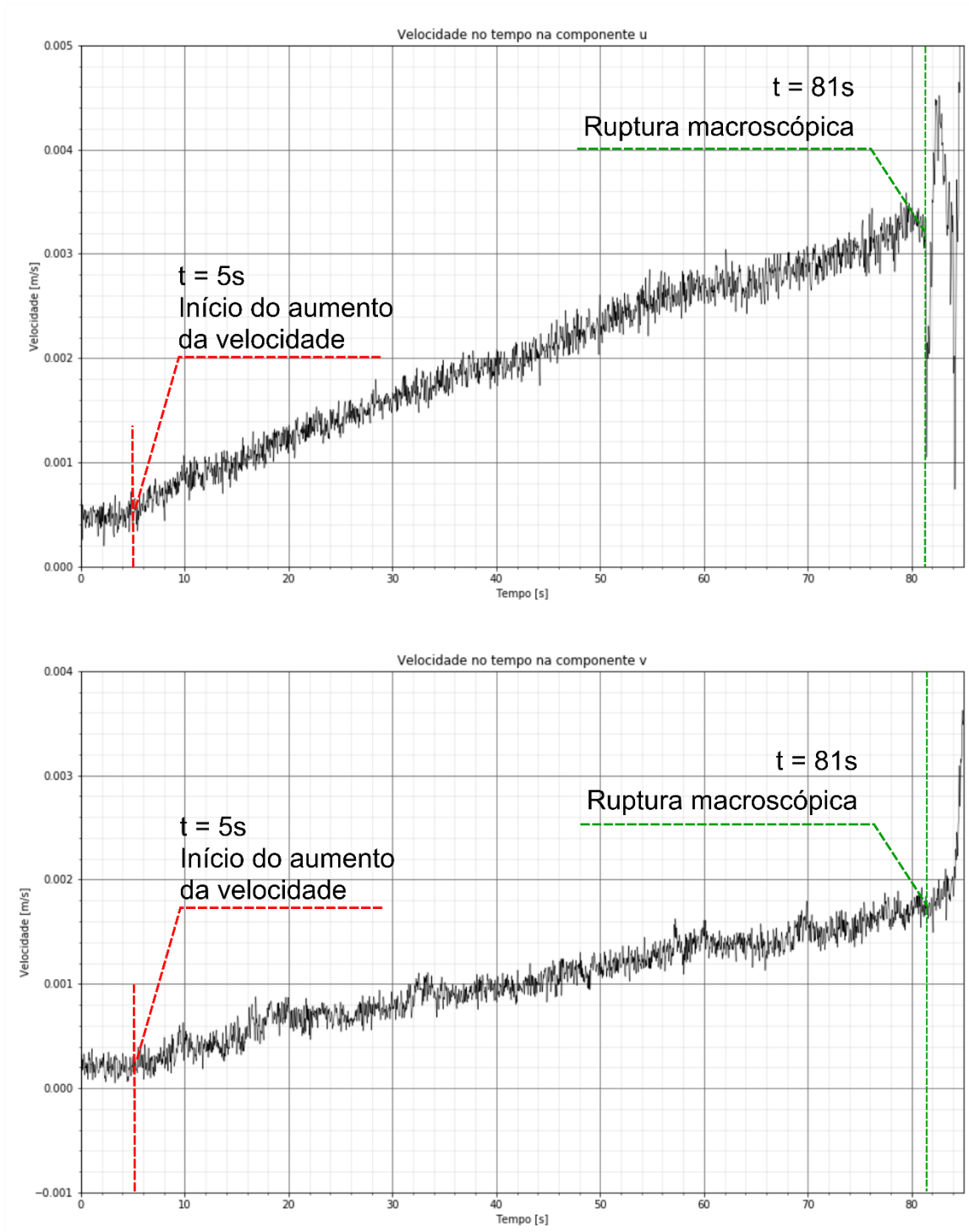


Figura 6.10: Ensaio 3 – molhado, AF-5: velocidades calculadas nas componentes u e v .

7. VISÃO GERAL DOS RESULTADOS

O uso de acelerômetros para fins de monitoramento de estabilidade de encostas é inovador, principalmente visando sua incorporação como sensor em um sistema de alerta antecipado. Ao consultar a bibliografia nacional e internacional percebe-se o interesse de incluir estes dispositivos para monitoramento geotécnico com finalidades diversas. Nos trabalhos consultados, nota-se que não há ainda consenso sequer em relação a quais posições do taludes devem ser instrumentadas: Arnhardt *et al.* (2007) e Leão e Souza (2018) instalaram estes sensores em superfície, enquanto Ooi *et al.* e Giri *et al.* (2018) instalaram-nos enterrados no solo. Segalini & Corini (2013), por sua vez, desenvolveram e testaram em laboratório um dispositivo para enterrar no solo, com o qual é medida a variação de inclinação e calculado o deslocamento.

Nas referências consultadas na literatura internacional e que apresentam resultados (Ooi *et al.* 2014; Giri *et al.* 2018) os acelerômetros são utilizados como dispositivos para avaliar qualitativamente a deflagração e evolução de escorregamentos. Isto é, as pesquisas utilizam os acelerômetros associados a giroscópios para verificar se ocorre rotação dos sensores e definir o tipo de escorregamento simulado. No entanto, as pesquisas não se concentram em determinar o instante a partir do qual essas variações começam a ser medidas em relação à ruptura geral. Assim, nas aplicações consultadas na literatura técnica os acelerômetros não são utilizados como sensores para identificar sinais que antecedem à ruptura, objetivo desta pesquisa de mestrado. Nesse sentido, os resultados alcançados nesta pesquisa são uma inovação dentro do assunto de monitoramento de encostas, devido a que os sensores utilizados mostraram claramente a identificação de sinais prévios à ruptura com até minutos de antecedência em movimentos rápidos a muito rápidos, e principalmente, antes de qualquer feição macroscópica indicativa da ruptura pudesse ser observada.

Os resultados dos ensaios de simulação mostram a importância de se trabalhar com frequências de aquisição de dados elevadas, para não ocorrer a perda de informações valiosas, bem como o enriquecimento dos dados coletados ao se trabalhar com dispositivos triaxiais. De fato, Ooi *et al.* (2014) e Giri *et al.* (2018) utilizaram nas suas pesquisas acelerômetros de três eixos associados a giroscópios triaxiais, o que possibilitou identificar movimentos de translação e/ou rotação.

Por fim, observou-se nos dados coletados uma possível correlação de aumentos de aceleração com aumentos de vazão de entrada de água, o que reforça a ideia de que a saturação do solo é um fator preponderante na deflagração de escorregamentos. A relação da

infiltração de água no solo e a deflagração de escorregamentos é um dos princípios utilizados para definir sistemas de alerta antecipado em aproximações fenomenológicas (Vassallo *et al.* 2015) e no qual se baseiam sistemas de alerta nacionais, como o PPDC e o Alerta-Rio. Leão & Souza (2018), utilizando um protótipo de sistema de monitoramento em encosta real com acelerômetros triaxiais, também identificaram o aumento de taxa de aceleração durante e após eventos de precipitação mais intensos. Isto reforça a importância de se associar os acelerômetros com dispositivos de medição de umidade do solo em pesquisas futuras.

8. CONCLUSÃO

Esta pesquisa estudou a aplicação de acelerômetros como sensores enterrados no solo para detecção de sinais que evidenciem a iminência da ocorrência de um movimento de massa. Foram testados acelerômetros de alta e de baixa frequência (400/4.000Hz e 1Hz, respectivamente) em ambiente de laboratório, fazendo-se escorregar um solo arenoso em uma caixa de simulação de escorregamentos.

Em condições secas puderam ser simulados escorregamentos translacionais muito rápidos. Os dados de aceleração coletados com os acelerômetros de alta frequência (AF) mostraram que é possível detectar sinais prévios à ruptura com 4 a 5s de antecedência. Já, os acelerômetros de baixa frequência (BF) não se movimentaram durante o ensaio, em função do seu tamanho e das dimensões do escorregamento simulado. Isto sugere que o tamanho destes dispositivos para as dimensões da caixa experimental em ensaios secos não é adequado. No entanto, não se descarta o uso dos mesmos em taludes reais.

Em condições de umidade, foi possível simular escorregamentos rotacionais rápidos a muito rápidos, nos quais todos os acelerômetros instalados se movimentaram junto com o solo.

Os dados coletados com os acelerômetros de alta frequência permitiram identificar com minutos de antecedência acelerações prévias à ruptura. Além disso, com os resultados é possível caracterizar qualitativamente a evolução do movimento, ao identificar as regiões que se movimentaram primeiro e as subsequentes. Os dados coletados com estes acelerômetros estão de acordo com as observações macroscópicas realizadas, porém permitem um entendimento mais detalhado das alterações na massa de solo que antecede a ruptura macroscópica. Em especial, no Ensaio 3 um dos sensores registrou desaceleração (diminuição de aceleração e, consequentemente, de velocidade) antes da ruptura macroscópica global, contrariamente ao preconizado pela maioria dos métodos propostos na literatura técnica para previsão do tempo até a ruptura de um talude. Isto evidencia a importância de se trabalhar com sensores associados, de se analisarem os dados coletados pelos vários sensores de forma conjunta e que nem sempre uma diminuição da velocidade do movimento implica em tendência de estabilização.

No Ensaio 2, nota-se, ainda, que parece existir relação entre o aumento de vazão de água e o início do aumento da aceleração, ou seja, o início da movimentação do solo, sendo tal efeito imperceptível a partir das observações macroscópicas.

Nos ensaios realizados observa-se que, nas frequências de aquisição utilizadas, em movimentos mais lentos, como o do Ensaio 2, é possível identificar sinais prévios à ruptura com mais tempo de antecedência do que em movimentos mais rápidos. Isto está relacionado às características do movimento em si e não às características dos sensores. Nesta pesquisa todos os movimentos de massa simulados foram rápidos/muito rápidos. Os sensores testados mostraram-se capazes de detectar sinais prévios à ruptura mesmo nestas condições extremas de movimentação. Nestas situações, os resultados obtidos com os sensores de baixa frequência e de alta frequência evidenciaram que a frequência de aquisição é um fator determinante na identificação de sinais prévios. Ao se trabalhar com frequência mais baixa, sinais que foram captados pelos acelerômetros de alta frequência não foram identificados. Em alguns casos, estes sensores sequer identificaram a iminência da ruptura e em outros, identificaram com menor tempo de antecedência.

Em taludes reais o monitoramento e a gestão do risco de escorregamentos é possível apenas para movimentos mais lentos que aqueles simulados nesta pesquisa, de tal forma que se espera que em situações de taludes reais os acelerômetros sejam capazes de registrar sinais prévios à ruptura com antecedência de tempo maior do que alguns segundos/poucos minutos.

Ainda sobre a detecção antecipada de movimentos de massa, os resultados desta pesquisa mostram que a tendência de variação da velocidade durante o ensaio é muito semelhante à tendência de variação da aceleração. Propõe-se assim que, em pesquisas futuras, seja desenvolvido um protocolo de análise dos 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 sensores.

Para pesquisas futuras sugere-se também a associação dos acelerômetros a outros sensores, tais como giroscópios ou magnetômetros, de tal forma que as modificações na inclinação dos eixos dos acelerômetros possam ser conhecidas, bem como sensores de umidade do solo.

REFERÊNCIAS

- Ahrendt, A. *Movimentos de massa gravitacionais - proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão - SP*. 2005. 390 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005
- Arnhardt, C.; Asch, K.; Azzam, R.; Bill, R.; Fernández-Steege, T.M.; Homfeld, S.; Kallash, A.; Niemeyer, F.; Ritter, H.; Toloczyki, M.; Walter, K. Sensor Based Landslide Early Warning System - SLEWS: Development of a geoservice infrastructure as basis for early warning systems for landslides by integration of real-time sensors. *Geotechnologien Science Report: Early Warning Systems in Earth Management. Kick-off-meeting*, Technical University Karlsruhe, 10, p.75-88, 10 out. 2007
- Askarinejad, A.; Akca, D.; Springman, S.. Precursors of instability in a natural slope due to rainfall: a full-scale experiment. *Landslides*, **15**, 9, p.1745-1759, 30 abr. 2018.
- Askarinejad, A.; Springman, S.M. A novel technique to monitor subsurface movements of landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, **55**, n. 5, p.620-630, maio 2018. Canadian Science Publishing.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. *NBR 12004: Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos – Método de ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. *NBR 6457: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. *NBR 7181: Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.
- Avelar, A. S. *Iniciação e desenvolvimento de fluxos detriticos em encosta: ensaios triaxiais de choque em caixa experimental abordando o caso de Soberbo (RJ)*. 2003. 247 f. Tese (Doutoramento) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- Azzam, R.; Arnhardt, C.; Fernández-Steege, T.m.. Monitoring and early warning of slope instabilities and deformations by sensor fusion in self-organized wireless ad-hoc sensor networks. *J. Se Asian Appl. Geol.*, **2**, n. 3, p.163-169, set. 2010.
- Brasil. Ministério das Cidades/Cities Alliance. *Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais*. Carvalho, C.S., Galvão, T (organizadores). Brasília: Ministério das Cidades; Cities Alliance, 2006.
- Brasil. Ministério das Cidades/Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. *Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios*. Carvalho, C.S., Macedo, E.S., Ogura, A.T. (organizadores). Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007.
- Calvello, M.; D’orsi, R.N.; Piciullo, L.; Paes, N.; Magalhaes, M.; Lacerda, W.A. The Rio de Janeiro early warning system for rainfall-induced landslides: Analysis of performance for the years 2010–2013. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **12**, p.3-15, jun. 2015.

- Carla, T., Intrieri, E., Traglia, F.D., Nolesini, T., Gigli, G., Casagli, N. Guidelines on the use of inverse velocity method as a tool for setting alarm thresholds and forecasting landslides and structure collapses. *Landslides*, **14**, p. 517-534, jul. 2017.
- Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais – CEMADEN. *Municípios monitorados*. Disponível em: <<https://www.cemaden.gov.br/municipios-monitorados-2/>>. Acesso em: 11 jul. 2018.
- Chen, R.; Kuo, K.W.; Chen, Y.; Ku, C. Model tests for studying the failure mechanism of dry granular soil slopes. *Engineering Geology*, **119**, n. 1-2, p.51-63, abr. 2011. Elsevier BV.
- Corominas, J.; Moya, J.; Ledesma, A.; Lloret, A.; Gili, J.A. Prediction of ground displacements and velocities from groundwater level changes at the Vallcebre landslide (Eastern Pyrenees, Spain). *Landslides*, **2**, n. 2, p.83-96, 12 maio 2005. Springer Nature.
- Crozier, M. J.; Glade, T.. Landslide Hazard and Risk: Issues, Concepts and Approach. *Landslide Hazard And Risk*, p.1-40, 10 abr. 2012.
- Cruden, D.M; Varnes, D.J.. Landslide types and processes. In: Turner, A.K.; Schuster, R.L. (Ed.). *Landslides investigations and mitigation*. Transportation research board, US National Research Council. Special report 247. Washington, DC, 1996. Cap. 3. p. 36-75.
- Federico, A., Popescu, M., Elia, G., Fidelibus, C., Internò, G., Murianni, A. Prediction of time to slope failure: a general framework. *Environmental Earth Sciences*, **66** p. 245-256. 2012.
- Fell, R.; Ho, K.K.S.; Lacasse, S.; Leroi, E. A framework for landslide risk assessment and management. In: Hungr, Oldrich et al. *Landslide Risk Management*. Londres: Crc Press, 2005. p. 3-25.
- Filho, N.F., Faria, M.S.C. Relevô e dinâmica superficial. In: Oliveira, A.M.S., Monticeli, J.J. (Eds). *Geologia de Engenharia e Ambiental*. 1ª ed. São Paulo, ABGE, 2018. Capítulo 11, p. 203-228.
- Fraden, J. Velocity and acceleration. In: Fraden, J. (autor). *Handbook of Modern Sensors*. 3a ed. Suíça, Springer, 2016. Capítulo 9, p. 379 – 411.
- Franco, Y. B.; Silva, J.L.; Valentin, C. A new small-scale test apparatus for modeling buried pipes under axial or lateral soil loading. *Geotechnical Testing Journal*, **43**, N. 1, 7 Fev. 2019.
- Fukuzono, T.A. A new method for predicting the failure time of a slope. In: *Proceedings of the Fourth International Conference and Field Workshop on Landslides*, p. 145-50. Tokyo, Japan Landslides Society, 1985.
- Giri, P.; Ng, K.; Phillips, W. Laboratory simulation to understand translational soil slides and establish movement criteria using wireless IMU sensors. *Landslides*, **15**, n. 12, p.2437-2447, 4 set. 2018.
- Godôis, J.V. *Estudo do comportamento de um escorregamento ativo na Serra da Cantareira – SP*. 2011. 118p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- Hungr, O.; Leroueil, S.; Picarelli, L. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, **11**, n. 2, p.167-194, 2014.

- Idaho Geological Survey. *Landslide hazards*. Disponível em: <https://www.idahogeology.org/sites/default/files/2018-images/landslide_types.jpg>. Acesso em: 26 ago. 2019.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. *Areia normal brasileira*. Disponível em: <<http://www.ipt.br/areianormal>>. Acesso em: 18 abr. 2019.
- International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI). A suggested method for describing the rate of movement of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. 1995. **52**, p.75-78.
- Leão, J.C., Souza, P.H. Sistema de monitoramento de deslizamento de solos. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, **7**, p.508-524. 2018.
- Li, C. *Multi-sensor data fusion for Geohazards Early Warning System - an adapted process model*. 2015. 117 f. Tese (Doutorado) - Georessourcen Und Materialtechnik, Rheinisch-westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen, 2015.
- Li, C.; Azzam, R.; Fernández-Steeger, T.. Kalman Filters in Geotechnical Monitoring of Ground Subsidence Using Data from MEMS Sensors. *Sensors*, **16**, n. 7, p.1109-1123, 19 jul. 2016.
- Lourenço, S.D.N; Sassa, K.; Fukuoka, H. Failure process and hydrologic response of a two layer physical model: implications for rainfall-induced landslides. *Geomorphology*, **73**, n.1-2, p. 115-130, 2005.
- Macedo, E.S., Mirandola, F.A. Gestão de Riscos Geológicos.In: Oliveira, A.M.S., Monticeli, J.J. (Eds). *Geologia de Engenharia e Ambiental*. São Paulo, ABGE, 2018. Capítulo 37, p. 279-300.
- Olivares, L.; Damiano, E. Postfailure Mechanics of Landslides: Laboratory Investigation of Flowslides in Pyroclastic Soils. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, **133**, n. 1, p.51-62, jan. 2007. American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Ooi, G.L.; Wang, Y.; Tan, P.S.; So, C.F.; Leung, M.L.; Li, X.; Lok, K.H. An Instrumented Flume to Characterize the Initiation Features of Flow Landslides. *Geotechnical Testing Journal*, **37**, n. 5, p.1-21, 15 jul. 2014.
- Petley, D.N. The evolution of slope failures: mechanisms of rupture propagation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **4**, p. 147-152. 2004.
- Petley, D.N., Bulmer, M.H., Murphy, W. Patterns of movement in rotational and translational landslides. *Geology*, **30**, n. 8, p. 719-722. 2002.
- Ramesh, M. V. Real-time wireless sensor network for landslide detection. In: International Conference on Sensor Technology And Applications, 3., 2009, [S.I.]. *Proceedings...*. IEEE, 2009. p. 405 - 409.
- Ruiz, L. B.. *MANÁ: Uma arquitetura para gerenciamento de redes de sensores sem fio*. 2003. 214 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

- Sasahara, K. Prediction of the shear deformation of a sandy model slope generated by rainfall based on the monitoring of the shear strain and the pore pressure in the slope. *Engineering Geology*, **224**, p.75-86, jun. 2017.
- Segalini, A.; Carini, C. Underground landslide displacement monitoring: a new MEMS based device. In: Margottini, C.; Canuti, P.; Sassa, K. (eds). *Landslide science and practice – Volume 2: early warning, instrumentation and monitoring*. Springer, 2013. P. 87 – 93.
- Sheth, A; Thekkath, C.A. Senslide: a distributed landslide prediction system. *Acm Sigops Operating Systems Review*, **41**, n. 2, p.75-87, 1 abr. 2007.
- Stähli, M.; Satalle, M.; Huggel, C.; Mcardell, B.W.; Van Herwinjen, A.; Berne, A.; Schleiss, M.; Ferrari, A.; Kos, A.; Or, D.; Springman, S.M. Monitoring and prediction in early warning systems for rapid mass movements. *Natural Hazards And Earth System Science*, **15**, n. 4, p.905-917, 24 abr. 2015.
- United Nations Office For Disaster Risk Reduction - UNISDR. *Terminology*. Disponível em: <<https://www.unisdr.org/we/inform/terminology>>. Acesso em: 26 agosto 2019.
- Varnes, D.J.. Slope movement types and processes. In: Schuster,R.L.; Krizek, R.J. (Ed.). *Landslides, analysis and control: special report 176*. Transportation research board, National Academy of Sciendes. Washington, DC, 1978. p. 11-33.
- Vassallo, R.; Grimaldi, G.M.; Di Maio, C. Pore water pressures induced by historical rains series in a clayey landslide: 3D modeling. *Landslides*, **12**, p. 731-744, 2015.
- Wang, G; Sassa, K. Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effects of grain size and fine-particle content. *Engineering Geology*, **69**, n. 1-2, p.109-125, 2002.
- Yin, Y.; Wang, H.; Gao, Y.; Li, X. Real-time monitoring and early warning of landslides at relocated Wushan Town, the Three Gorges Reservoir, China. *Landslides*, **7**, n. 3, p.339-349, 28 maio 2010.