

ORGANIZAÇÃO SEDIMENTOLÓGICA DE FLUXO DE LAMA ARENOSA GERADO EM LABORATÓRIO

Julio Cesar Paisani¹

Gustavo Gallardo Aere²

Matheus Vinícius dos Santos³

Adelaine Firmino da Silva³

Flávia Jorge de Lima⁴

Introdução

Os depósitos sedimentares de encosta são gerados tanto por movimentos de massa quanto por escoamento superficial (Thomas, 1994). Existem diferentes critérios envolvidos na classificação dos movimentos de massa (Varnes, 1978; Selby, 1993; Martinsen, 1994; Cousot; Meunier, 1996), o que dificulta denominar e interpretar registros estratigráficos quaternários de encosta. Já o escoamento superficial tem seus registros estratigráficos identificados enquanto laminados e atribuídos a fluxos fluídos, isto é, fluxos de baixa densidade (Paisani *et al.*, 2023a). Nós temos aplicado a perspectiva reológica e de mecânica dos fluídos para classificar e interpretar depósitos de encosta, tendo a microsedimentologia (e/ou microestratigrafia) como principal base de informações (Paisani *et al.*, 2023b). Além disso, nossa abordagem metodológica visa compreender os processos geradores de depósitos de encosta em uma variedade de circunstâncias e condições ambientais.

Para viabilizar a aplicação dessa abordagem, nós geramos em laboratório fluxos com diferentes concentrações de sedimentos que simulam o transporte e deposição do escoamento superficial com sedimentos granulares, e analisamos sua microsedimentologia (Paisani *et al.*, 2023c; Paisani, Santos, Sordi, 2023). Igualmente, comparamos registros estratigráficos gerados pelo escoamento superficial em condições naturais modernas com simulações físicas em laboratório e verificamos que a maiorias das laminações decorrentes do escoamento superficial tem características de fluxos de alta densidade, justamente o esperado para algumas categorias de movimentos de massa (Paisani *et al.*, 2023a). É nesse contexto que se insere o presente

¹ Professor Doutor em Geografia, UNIOESTE/Francisco Beltrão – PR, juliopaisani@hotmail.com;

² Graduando em Bacharelado em Geografia, UNIOESTE/Francisco Beltrão-PR, Bolsista de Iniciação Científica/CNPq, UNIOESTE/Francisco Beltrão - PR, gustavvogallardoere@outlook.com;

³ Doutorando (a) do Programa de Pós-Graduação em Geografia da UNIOESTE/Francisco Beltrão - PR, matheusvini.geo@gmail.com; adelaine_silva@outlook.com;

⁴ Professora Doutora em Geografia, UFAL/Campos Sertão/ Delmiro Gouveia-AL, flavia.limageo@gmail.com.

trabalho. Ele traz resultados parciais da organização sedimentológica de fluxos de lama arenosa gerados em experimentação física em laboratório com concentração volumétrica de sedimentos de 30 e 41 %. Para tanto são apresentados os parâmetros hidráulicos dos fluxos e respectivas organizações sedimentológicas de superfície e de acamamento. Enquanto resultado verificou-se: (i) fenômeno de cavalgamento entre calda e cabeça de fluxo no plano de sedimentação; (ii) desenvolvimento de estruturas deformacionais da fração grossa. Essa classe de estruturas sedimentares decorre do cisalhamento do fluxo de lama arenosa com areia do plano de sedimentação.

Materiais e Métodos

Foi utilizada estação experimental do Núcleo de Estudos PaleoAmbientais (NEPA/UNIOESTE), a qual foi concebida para simular a geração de escoamento superficial com diferentes concentrações de pedosedimentos. A estação é composta por três partes independentes: i) cilindro para armazenamento de água ou mistura de água e sedimentos; ii) *flume* (rampa) de deslocamento de fluxo; iii) plano de acumulação de sedimentos (Paisani *et al.*, 2023a- ver *Suppl.Mat.*). A *flume* de deslocamento de fluxo apresenta inclinação regulada e foi ajustada para 31°, enquanto o plano de sedimentação está ajustado a inclinação de 4°. Nós substituímos o cilindro para armazenamento de água ou mistura de água e sedimentos por tanque de modo a melhorar a performance de liberação da mistura (Aere *et al.*, 2023). O tanque de mistura de água e sedimentos foi confeccionado em chapa de aço inoxidável de 0,43 mm de espessura com dimensões de ~22,5cm de largura. O tanque está conectado a calha no formato de chaminé, perfazendo 72 cm de altura, que recebe mistura de água e pedosedimentos e termina em placas dissipadoras de fluxo com três canaletas independentes de 23 cm de comprimento. O sistema é fixo e está instalado no limite superior da *flume*. No início do plano de sedimentação foi instalada uma caixa de aço inoxidável (0,16 x 0,13 x 0,13 m) para coleta de amostra para determinação da concentração volumétrica dos fluxos durante a sedimentação.

A fração sólida composta nos fluídos é natural e corresponde a mistura de areia quartzo/arcosiana e lama de endopedon de Latossolo descrito na superfície interplanática (S6) do Planalto Vulcânico do Sul do Brasil (Paisani *et al.*, 2013). A fração lama foi obtida por maceração dos blocos subangulares naturais e individualizada por peneiramento seguindo a

¹ Professor Doutor em Geografia, UNIOESTE/Francisco Beltrão – PR, juliopaisani@hotmail.com;

² Graduando em Bacharelado em Geografia, UNIOESTE/Francisco Beltrão-PR, Bolsista de Iniciação Científica/CNPq, UNIOESTE/Francisco Beltrão - PR, gustavvogallardoere@outlook.com;

³ Doutorando (a) do Programa de Pós-Graduação em Geografia da UNIOESTE/Francisco Beltrão - PR, matheusvini.geo@gmail.com; adelaine_silva@outlook.com;

⁴ Professora Doutora em Geografia, UFAL/Campos Sertão/ Delmiro Gouveia-AL, flavia.limageo@gmail.com.

escala de Wentworth (1922) (argila e silte, $\leq 0,0625$ mm). Nós misturamos essas frações sólidas secas para cada repetição a uma proporção de 20 % (R29) e 40 % (R30) de fração grossa para 80 a 60 % de lama, respectivamente. A proporção de areia foi inferior a 50% do volume, caracterizando o sedimento como lama arenosa (*sandy mud* - Ghibaudo, 1992). A densidade seca da lama arenosa (método balão volumétrico com álcool etílico) é de 1.770 Kg.m^{-3} .

A fração líquida foi pensada de modo a viabilizar a etapa de análise microsedimentológica. Para aplicação da referida técnica os exemplares coletados têm que passar por etapas necessárias para a confecção de seções delgadas, cujo primeiro passo é a secagem e posterior impregnação dos exemplares com resina, como descrito por Paisani *et al.* (2023a). Para evitar contrações do material durante a secagem e obliteração das microestruturas foi utilizada acetona P.A. enquanto fração líquida, cuja densidade a 20° C é de 790 kg.m^{-3} . Enfim, os fluxos compreenderam a mistura de 250 a 502 g de sedimentos com 400 a 700 ml de acetona.

Diante da periculosidade do uso da acetona, foram geradas duas repetições (códigos R29 e R30). Na sequência foram determinadas os seguintes parâmetros hidráulicos dos fluxos: velocidade média do fluxo ($V_m = \text{m.s}^{-1}$), com base em filmagem usando software MPC-HC; profundidade do fluxo ($D = \text{m}$) e largura do fluxo ($L = \text{m}$), bem como os números de Froude ($Fr = V_m/\sqrt{(g.D)}$) e Reynolds ($Re = V_m.D/\nu$), sendo g é a força da gravidade e ν é a viscosidade cinemática da água.

Para os materiais sedimentados foram analisadas a organização sedimentológica de superfície e do acamadamento. A primeira foi feita por observação direta enquanto a segunda por meio de lâminas delgadas (análise microsedimentológica). Exemplares foram selecionados e submetidos a impregnação e laminação igualmente ao que tem sido feito em trabalhos anteriores (Paisani *et al.*, (2023a,c; Paisani, Santos, Sordi, 2023). A análise microsedimentológica foi feita em quatro lâminas delgadas orientadas paralelamente a direção dos fluxos, cuja confecção e análise foi realizada nos LabMulti de Laminação e Microscopia Ótica do NEPA, respectivamente.

Resultados e Discussão

¹ Professor Doutor em Geografia, UNIOESTE/Francisco Beltrão – PR, juliopaisani@hotmail.com;

² Graduando em Bacharelado em Geografia, UNIOESTE/Francisco Beltrão-PR, Bolsista de Iniciação Científica/CNPq, UNIOESTE/Francisco Beltrão - PR, gustavvogallardoere@outlook.com;

³ Doutorando (a) do Programa de Pós-Graduação em Geografia da UNIOESTE/Francisco Beltrão - PR, matheusvini.geo@gmail.com; adelaine_silva@outlook.com;

⁴ Professora Doutora em Geografia, UFAL/Campos Sertão/ Delmiro Gouveia-AL, flavia.limageo@gmail.com.

A mistura final de sedimentos e acetona implicou em fluxos lama arenosos com concentração volumétrica de 30% (R29) a 41% (R30). Esses valores correspondem a fluxo de lama com concentração de sedimentos de alta-densidade. Na perspectiva reológica os fluxos são geralmente enquadrados em três categorias em função da concentração de sedimentos: baixa-densidade, transicional e alta-densidade (Dasgupta, 2003), embora não haja consenso quanto aos valores de concentração de sedimentos que determinem o enquadramento dos fluxos em cada uma dessas categorias (Shanmugam, 1996).

O funcionamento do experimento gerando fluxo de lama pode ser visualizado pelo Instagram no seguinte endereço: <https://www.instagram.com/reel/Cwa9A-8oeKj/?igsh=MWZjazV2NTJmZWd2eQ==>. A velocidade média da repetição R30 na *flume* não pode ser determinada por problemas de filmagem, o que inviabilizou determinar os números de Froude e Reynolds. No plano de sedimentação variou de 0,13 a 0,70 m.s⁻¹. Já a velocidade média da R29 ficou em 0,15 m.s⁻¹ na *flume*, com redução no plano de acumulação de sedimentos de cerca de 40 %. Nesse local de acomodação ambos os fluxos sofreram o efeito de cavalcamento da calda (Paisani *et al.*, 2023a), haja vista que a velocidade da cabeça foi superada pela velocidade da calda (Manica, 2012). Para R29 os números de Froude e Reynolds expressão características de subcrítico-laminar na *flume* e início do plano de acumulação de sedimentos. Com fenômeno de cavalcamento dos fluxos no plano de sedimentação, o fluxo R29 passou de subcrítico-laminar para subcrítico-transicional entre laminar e turbulento. No caso do fluxo R30 no plano de sedimentação passou de subcrítico-transicional para supercrítico-turbulento. A mudança nas características hidráulicas dos fluxos expressa a calda mais diluída, isto é, com menor concentração de sedimentos (Sohn, Choe, Jo, 2002). Isso implica que os fluxos R29 e R30 sofreram redução na concentração de sedimentos desde a chegada no plano de sedimentação.

O fenômeno de cavalcamento foi intensificado diante da forte inclinação da *flume*. A extensão da sedimentação foi distinta, enquanto R29 gerou depósito por 18 cm de extensão a R30 teve deposição se estendendo por 60 cm. Essa diferença se deve ao conteúdo de fluido na mistura dos fluxos, sendo maior na R30 (700 ml de acetona) em comparação com a R29 (400 ml de acetona).

Os fluxos se espalharam homoganeamente sobre a superfície não desenvolvendo marcas e impressões superficiais (ex. lavagem, sulcos, lavradas por objetos etc), apenas limites frontais

¹ Professor Doutor em Geografia, UNIOESTE/Francisco Beltrão – PR, juliopaisani@hotmail.com;

² Graduando em Bacharelado em Geografia, UNIOESTE/Francisco Beltrão-PR, Bolsista de Iniciação Científica/CNPq, UNIOESTE/Francisco Beltrão - PR, gustavvogallardoere@outlook.com;

³ Doutorando (a) do Programa de Pós-Graduação em Geografia da UNIOESTE/Francisco Beltrão - PR, matheusvini.geo@gmail.com; adelaine_silva@outlook.com;

⁴ Professora Doutora em Geografia, UFAL/Campos Sertão/ Delmiro Gouveia-AL, flavia.limageo@gmail.com.

irregulares tipos ‘linguas’ (tongues - Paisani, Santos, Sordi, 2023). Essa estrutura de superfície difere de fluxos de baixa concentração (~ 3-8 %) de sedimentos granulares gerados no experimento, os quais desenvolveram marcas e impressões superficiais (Paisani, Santos, Sordi, 2023; Paisani *et al.*, 2023c).

O depósito do fluxo com concentração volumétrica 30% (R29) incorporou cerca de 5% de areia quartzo/arcosiana do assoalho, disposta de forma randômica no fundo matricial lamoso. Por outro lado, o fundo matricial é majoritariamente granular constituído de microagregados (tamanho silte) de lama, embora localmente estejam suturados formando fundo matricial denso. Esse aspecto granular não foi gerado pela turbulência de cisalhamento do fluxo como sugerido em experimentação física (Cuthbertson; Samsami; Dong (2018), mas deriva da formação de microagregados artificialmente gerados diante da floculação por ocasião da maceração e peneiramento. A floculação a seco supostamente se assemelha a floculação a úmido, onde Fe (II) em contato com argilomineral 1:1 gera a neutralização de carga e/ou coagulação por varredura (Manaf Febina and Priya, 2024). Assim, mesmo com a mistura de sedimentos com acetona, poderoso solvente, não ocorreu a liquefação total do sedimento mantendo os microagregados que, por sua vez, atribuíram ao fluxo comportamento de fluxo de alta densidade supostamente não-coesivo. O aspecto coeso ocorre localmente (fundo matricial denso) e consiste na perda de resistência dos microagregados, possivelmente diante da rápida desidratação dos microporos (Maltman, 1994).

O depósito do fluxo com concentração volumétrica 41% (R30) é constituído predominantemente de microagregados (em média de 69%), mas difere do anterior nos seguintes aspectos: (i) incorporação de areia quartzo/arcosiana do assoalho (em média de 21%); (ii) areia se mostra disposta de forma randômica (Índice de Concentração de Microestrutura da Fração Grossa - Mci em média de 15,8%, conforme Paisani, Manica, submetido), agrupada vertical e horizontal (Mci em média de 11,6%) e majoritariamente em espiral (Mci em média de 72,5 %); e (iii) poros parcialmente preenchidos subhorizontais descontínuos lateralmente sindeposicionais (em média de 10%). A incorporação de areia quartzo/arcosiana do assoalho expressa o cisalhamento do fluxo supercrítico-turbulento. A disposição da fração areia em espiral e agrupada são interpretadas enquanto estruturas deformacionais secundárias (c-fabric) dos tipos: galáxia/rotação, agrupamento vertical típico e agrupamento subhorizontal enquanto bandeamento, respectivamente (Paisani *et al.*, 2023b). Poros parcialmente preenchidos

¹ Professor Doutor em Geografia, UNIOESTE/Francisco Beltrão – PR, juliopaisani@hotmail.com;

² Graduando em Bacharelado em Geografia, UNIOESTE/Francisco Beltrão-PR, Bolsista de Iniciação Científica/CNPq, UNIOESTE/Francisco Beltrão - PR, gustavvogallardoere@outlook.com;

³ Doutorando (a) do Programa de Pós-Graduação em Geografia da UNIOESTE/Francisco Beltrão - PR, matheusvini.geo@gmail.com; adelaine_silva@outlook.com;

⁴ Professora Doutora em Geografia, UFAL/Campos Sertão/ Delmiro Gouveia-AL, flavia.limageo@gmail.com.

subhorizontais correspondem a escapes de fluido intersticial (ar ou líquido) (Paisani, Santos, Sordi, 2023; Paisani *et al.*, 2023a,c).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os depósitos de fluxo de lama arenosa são generalizadamente interpretados como decorrentes de fluxos de alta densidade de lama liquefeita. Por outro lado, os resultados de nosso experimento mostram que os fluxos de lama arenosa podem ser predominantemente formados de microagregados de pedosedimentos na fração silte. A elevada inclinação da *flume* (31°) promoveu aceleração dos fluxos de modo a intensificar o fenômeno de cavalgamento da calda dos fluxos em relação a desaceleração das respectivas cabeças. Esse fenômeno deixou os fluxos como subcrítico-transicional entre laminar e turbulento (R29) a supercrítico-turbulento (R30) no plano de sedimentação, cujo último foi responsável pelo desenvolvimento de estruturas deformacionais da fração grossa tipos: galáxia/rotação, agrupamentos verticais e horizontais, além de distribuição aleatória da fração grossa. Essas estruturas decorreram do cisalhamento do fluxo de lama arenosa com areia do plano de sedimentação. O próximo passo é reduzir a inclinação da *flume* de modo verificar a manutenção do fenômeno de cavalgamento e se serão significativamente alteras as variáveis hidráulicas e as organizações sedimentológicas internas dos depósitos.

Palavras-chave: Fluxo de lama; Microsedimentologia, Processos de Encosta, Colúvio.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Proc. 302976/2021-3 e 405037/2023-6) e a Fundação Araucária do Paraná (Conv.288/2022) pelo fomento. Ao CNPq e a UNIOESTE (PRPPG) pela bolsa de IC.

REFERÊNCIAS

AERE, G.G., PAISANI, J.C., ARINI, J.O. Adequação de estação experimental de laboratório para geração de fluxos artificiais de alta concentração de sedimentos. *In:* 9º Encontro Anuais de Iniciação Científica, Tecnológica e Inovação-UNIOESTE/EAICTI, 2023, Cascavel. **Anais**

¹ Professor Doutor em Geografia, UNIOESTE/Francisco Beltrão – PR, juliopaisani@hotmail.com;

² Graduando em Bacharelado em Geografia, UNIOESTE/Francisco Beltrão-PR, Bolsista de Iniciação Científica/CNPq, UNIOESTE/Francisco Beltrão - PR, gustavvogallardoere@outlook.com;

³ Doutorando (a) do Programa de Pós-Graduação em Geografia da UNIOESTE/Francisco Beltrão - PR, matheusvini.geo@gmail.com; adelaine_silva@outlook.com;

⁴ Professora Doutora em Geografia, UFAL/Campos Sertão/ Delmiro Gouveia-AL, flavia.limageo@gmail.com.

[...]. Cascavel:UNIOESTE, 2023. Trabalho p.1-5, 2023. Disponível em: <https://midas.unioeste.br/sgev/eventos/9eaicti/anais> . Acesso em: 27 maio 2024.

COUSSOT, P.; MEUNIER, M. Recognition, classification and mechanical description of debris flows. **Earth-Science Reviews**, v. 40, n. 3, p. 209–227, 1996.

CUTHBERTSON, A.J.S., SAMSAMI, F., DONG, P. Model studies for flocculation of sand-clay mixtures. **Coastal Engineering** v.132, p.13-21, 2018.

DASGUPTA, P. Sediment gravity flow – the conceptual problems. **Earth-Science Reviews**, n. 62, 265-281, 2003.

MALTMAN, A. Introduction and overview. In: MALTMAN, A. (ed.), **The Geological Deformation of Sediments**. Chapman & Hall, London, 1994, pp. 127–16

MANICA, R. Sediment gravity flow: study based on experimental simulations. In: SCHULZ, H.; LOBOSCO, R.; SIMOES, A. (eds.), **Hydrodynamics: natural water bodies**. London: Interch Open, 2012, pp.263-286.

MANAF FEBINA, A.; PRIYA, K.L. Analysing the role of Fe (II) on flocculation of sand-clay mixtures under estuarine mixing. **Environmental Research** 251, 118590, 2024.

MARTINSEN, O.J. Mass movements. In: MALTMAN, A. (ed.), **The Geological Deformation of Sediments**. Chapman & Hall, London, 1994, pp. 127–16

PAISANI, J.C., MANICA, R. Constituent and microstructure concentration indexes for microsedimentological analysis in thin sections. **Revista Brasileira de Geomorfologia** submetido.

PAISANI, J.C., CÔRREA, A.C.B., MANICA, R., LIMA, F.J., AERE, G.G., SANTOS, M.V., PEREIRA, J.S. Simulação física de escoamento superficial com concentração de pedosedimentos entre 6 e 8%. **Revista de Geociências do Nordeste**, v.9, n.2, p.96-109, 2023c.

PAISANI, J.C., MANICA, R., SANTOS, M.C.P., RIBEIRO, R.A.R. Modern soil aggregates-colluvium generated by overland flow – stratigraphy and physical experiments. **Sedimentology** 70, 2150-2174, 2023a.

PAISANI, J.C., PEREIRA, J.S., SORDI, M.V., MANICA, R. Pleistocene-Holocene coluvial facies from the Volcanic Plateau of the Paraná Sedimentary Basin (Rio Grande do Sul, Brazil) – sedimentation processes and paleoenvironmental implications. **Journal of South American Earth Sciences** 126, 104344, 2023b.

PAISANI, J.C., PONTELLI, M.E., CÔRREA, A.C.B., RODRIGUES, R.A.R. Pedogeochemistry and micromorphology of oxisols - A basis for understanding etchplanation in the Araucárias Plateau (Southern Brazil) in the Late Quaternary. **Journal of South American Earth Sciences**, 48, 1 – 12, 2013.

PAISANI, J.C., SANTOS, M.C.P., DE SORDI, M.V. Low-concentrated overland flow generated in laboratory experiments: sedimentar structures and fabric. **Revista Brasileira de Geomorfologia** 24, 1-20, 2023.

SELBY, M. **Hillslope Materials and Processes**, 1993.Oxford Univ. Press

¹ Professor Doutor em Geografia, UNIOESTE/Francisco Beltrão – PR, juliopaisani@hotmail.com;

² Graduando em Bacharelado em Geografia, UNIOESTE/Francisco Beltrão-PR, Bolsista de Iniciação Científica/CNPq, UNIOESTE/Francisco Beltrão - PR, gustavvogallardoere@outlook.com;

³ Doutorando (a) do Programa de Pós-Graduação em Geografia da UNIOESTE/Francisco Beltrão - PR, matheusvini.geo@gmail.com; adelaine_silva@outlook.com;

⁴ Professora Doutora em Geografia, UFAL/Campos Sertão/ Delmiro Gouveia-AL, flavia.limageo@gmail.com.

SHANMUGAM, G. High-density turbidity currents: are they sandy debris flow? **Journal of Sedimentary Research**, n. 66, p. 2-10, 1996.

SOHN, Y.K., CHOE, M.Y., JO, H.R. Transition from debris flow to hyperconcentrated flow in a submarine channel (the Cretaceous Cerro Toro Formation, Southern Chile). **Terra Nova**, v.14, p. 405–415, 2002.

THOMAS, M. **Geomorphology in the Tropics: a study of weathering and denudation in low latitudes**, 1994. Wiley, Hoboken.

VARNES, D. J. Slope Movement Types and Processes. Em: SCHUSTER, R. L.; KRIZEK, R. J. (eds.). **Landslides: Analysis and control**. Transportation and Road research board. Washington D.C.: National Academy of Science, 1978. p. 11–33.

WENTWORTH, C.K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. **Journal Geology**, 30, 377-392, 1922.

¹ Professor Doutor em Geografia, UNIOESTE/Francisco Beltrão – PR, juliopaisani@hotmail.com;

² Graduando em Bacharelado em Geografia, UNIOESTE/Francisco Beltrão-PR, Bolsista de Iniciação Científica/CNPq, UNIOESTE/Francisco Beltrão - PR, gustavvogallardoere@outlook.com;

³ Doutorando (a) do Programa de Pós-Graduação em Geografia da UNIOESTE/Francisco Beltrão - PR, matheusvini.geo@gmail.com; adelaine_silva@outlook.com;

⁴ Professora Doutora em Geografia, UFAL/Campos Sertão/ Delmiro Gouveia-AL, flavia.limageo@gmail.com.