http://lsie.unb.br/ugb/
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 22, nº 3 (2021)

http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v22i3.1924

Artigo de Pesquisa

Comportamento hidro-erosivo de depósitos sedimentares da Formação Macacu Situados na Ilha do Governador-RJ

Hydro-erosive behavior of Macacu Formation sedimentary deposits located on Ilha do Governador-RJ

Hugo Portocarrero [1], Tácio Mauro Pereira de Campos [2], Aluísio Granato de Andrade [3] e Raphael Rodrigues Brizzi [4]

[1] Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Departamento de Geografia Física, Rio de Janeiro, Brasil. hportocarrero@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7733-6352

[2] Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, Brasil. tacio@puc-rio.br
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5169-2209

[3] Centro Nacional de Pesquisa de Solos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (CNPS/EMBRAPA), Departamento de Pesquisa, Rio de Janeiro, Brasil. aluisio.andrade@embrapa.br
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8032-8804

[3] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro (IFRJ), Arraial do Cabo, Brasil. raphael.brizzi@ifrj.edu.br
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4150-6484

Recebido: 01/05/2020; Aceito: 11/05/2021; Publicado: 01/07/2021

Resumo: A Ilha do Governador, inserida no contexto do Gráben da Guanabara, é marcada pela presença de exposições de depósitos sedimentares paleogênicos pertencentes à Formação Macacu. Tais exposições, atualmente evidentes em cortes de estrada e antigas jazidas para extração de material terroso, apresentam elevado grau de degradação causada pela erosão hídrica, o que é constatado a partir da presença de sulcos e voçorocas. O presente trabalho teve como objetivo analisar o comportamento hidro-erosivo de depósitos sedimentares da Formação Macacu expostos em uma jazida situada na área patrimonial do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, buscando relacionar sedimentologia, hidráulica e erodibilidade. Após a interpretação geológica das exposições de sedimentos, realizaram-se análises granulométricas e mineralógicas, ensaios de permeabilidade, avaliações dos espaços porais e ensaios de erodibilidade. Reconheceram-se cinco diferentes fácies sedimentares, lamitos arenosos e argilosos das fácies *La1* e *La2*, arenitos com estratificação cruzada acanalada das fácies *Aca1* e *Aca2*, e arenitos maciços da fácies *Am*. A organização em ciclos granodecrescentes e a existência de fácies lamosas laminadas a maciças e arenosas, com estratificação cruzada acanalada, linhas de seixos de quartzo e concentrações de concreções lateríticas, foram características bastante similares às encontradas tanto nos depósitos adjacentes, dentro da Ilha do Governador, como em outros depósitos da Formação Macacu. A similaridade composicional, textural, das características permoporosas e da erodibilidade das fácies *Aca1*, *Aca2* e *Am*, e a relativa distinção com as das fácies *La1* e *La2* possibilitaram a definição de duas zonas de comportamento hidro-erosivo homogêneo, marcadas pela presença de mecanismos específicos, de maneira análoga ao conceito de hidrofácies. A Zona I, constituída pelos lamitos, representa um aquitardo, mais erodível e menos permeável em relação às fácies arenosas, gerando formas côncavas e incisões verticais profundas, em alguns casos seguindo planos de fraturamento, laminação, ou estruturas de contração. A Zona II, constituída pelos arenitos, representa aquífero pobre com menor erodibilidade em relação à Zona I, esta última resultante da presença do cimento diagênico hematítico/goethítico, formando patamares e totens acima dos lamitos, e controlando a erosão local, cujo caminho se inicia

por sulcos estreitos e profundos que, quando atingem os lamitos, avançam até maiores profundidades. As duas zonas delimitadas apresentaram características permoporosas médias muito similares às obtidas para hidrofácies correlacionáveis descritas na literatura, e em termos de erodibilidade também apresentaram grande concordância com padrões já observados.

Palavras-chave: Sedimentologia; Permeabilidade; Porosidade; Erodibilidade.

Abstract: Governador Island, inserted in the context of the Gráben da Guanabara, is marked by the presence of paleogenic sedimentary deposits exposures belonging to the Macacu Formation. Currently evident in road cuts and old earth extraction deposits, these exposures show a high degree of degradation caused by water erosion, which is evidenced by the presence of rills and gullies. The present work aimed to analyze the hydro-erosive behavior of Macacu Formation sedimentary deposits exposed in an old loan area located in the patrimonial area of the International Airport of Rio de Janeiro (Brazil), seeking to relate sedimentology, hydraulics and erodibility. After the geological interpretation of the sediment exposures, granulometric and mineralogical analyzes, permeability tests, pore space evaluations and erodibility tests were performed. Five different sedimentary facies were recognized, sandy and clayey mudstones of facies *La1* and *La2*, sandstones with cross-stratification of facies *Aca1* and *Aca2*, and massive sandstones of the Am facies. The organization in decreasing granulometric cycles and the existence of muddy facies laminated to massive and sandstones with channeled cross-stratification, lines of quartz pebbles and concentrations of lateritic concretions, were characteristics very similar to those found both in the adjacent deposits, within Governador Island, as in other deposits of the Macacu Formation. The compositional, textural, permoporous and erodibility characteristics similarity of the *Aca1*, *Aca2* and Am facies and the relative distinction with those of the *La1* and *La2* facies enabled the definition of two zones of homogeneous hydro-erosive behavior marked by the presence of specific mechanisms, in a similar way to the concept of hydrofacies. Zone I, constituted by mudstones, represents an aquitard, more erodible and less permeable in relation to the sandy facies. Erosion develops through hollows and deep vertical incisions, in some cases following structural plans, lamination, or contraction structures. Zone II, made up of sandstones, represents a poor aquifer with less erodibility compared to Zone I. Lower erosion results from the presence of diagenic cement, and the zone forms plateaus and totems above the mudstones controlling local erosion, which begins its path through narrow and deep rills witch, after reaching the mudstones, expand and advance into greater depths. The two delimited zones showed average permoporous characteristics similar to those obtained for correlated hydrofacies described in the literature, and in terms of erodibility they also showed great agreement with patterns already observed.

Keywords: Sedimentology; Permeability; Porosity; Erodibility.

1. Introdução

A Ilha do Governador, inserida no contexto do Gráben da Guanabara, é marcada pela presença de exposições de depósitos sedimentares paleogênicos pertencentes à Formação Macacu (CPRM, 2016). Atualmente evidentes em cortes de estrada e antigas jazidas para extração de material terroso concentradas no entorno das avenidas Braz Crispino, Praia de Tubiacanga e na área patrimonial do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, estas exposições apresentam elevado grau de degradação propiciado pela erosão hídrica, evidenciado pela presença de sulcos e voçorocas.

Desde os anos 1970, os depósitos da Formação Macacu vêm sendo estudados sistematicamente, do ponto de vista sedimentológico (Meis & Amador 1972, 1974 e 1977; Amador, 1980; Dalcolmo *et al.*, 1982), estratigráfico (Almeida, 1976), ou tectono-sedimentar (Riccomini, 1989; Ferrari, 2001). A Bacia do Macacu, preenchida pela formação homônima, é considerada uma das principais áreas de ocorrência da sedimentação cenozóica no Estado do Rio de Janeiro, fazendo parte de conjunto de bacias tafrogênicas inseridas no que se denominou Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB). Este último, de idade paleógena (Riccomini *et al*., 2004), divide-se em três segmentos: o ocidental, que tem início no Estado do Paraná, englobando a Bacia de Curitiba e algumas ocorrências isoladas; o central, que compreende as bacias de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda; e o segmento oriental, no qual se inserem a Bacia do Macacu e a Bacia de Itaboraí (Riccomini *et al*., 2000).

A Formação Macacu apresenta características bastante semelhantes aos sedimentos do segmento central, constituída por sedimentos de natureza aluvial e lacustre pouco consolidados, de idade eocênica a oligocênica

(Ferrari, 2001). Análises sedimentológicas e faciológicas da referida formação vêm permitindo correlações estratigráficas envolvendo aspectos como heterogeneidade, granulometria, mineralogia, processos e estruturas presentes (Morais *et al*., 2006; Walter *et al*., 2011, Percílio *et al*., 2014; Fiuza, 2015), assim como estudos a respeito da erodibilidade (Araújo, 2000; Nagel *et al*, 2009; Storgatto *et al*, 2010) e suas propriedades hidráulicas (Barboza *et al*., 2008; Costa, 2010; Teramoto *et al*., 2019) vêm possibilitando melhor compreensão dos processos hidro-erosivos atuantes.

O presente trabalho teve como objetivo analisar o comportamento hidro-erosivo de depósitos sedimentares da Formação Macacu expostos em uma jazida situada no Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, buscando relacionar sedimentologia, hidráulica e erodibilidade. Para tanto, realizou-se interpretação geológica das exposições e análise do comportamento hidro-erosivo das diferentes fácies sedimentares reconhecidas a partir de análises *in loco*, coletas de amostras, ensaios de campo e análises laboratoriais.

2. Área de Estudo

A área de estudo constitui uma jazida para extração de material terroso, com 5 ha de perímetro total, localizada dentro da área patrimonial do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro Galeão/Tom Jobim, na Ilha do Governador (coordenadas 22°47'53" S, 43°13'16" O). Atualmente desativada, a jazida foi intensamente explorada durante a década de 1970 visando à construção das pistas de pouso e decolagem do aeroporto, o que acarretou em avançado grau de degradação ambiental, evidenciado pela intensa erosão ocasionada pela remoção da camada de solo e exposição dos depósitos sedimentares da Formação Macacu. O clima regional é o Aw (Köppen), com pluviosidade média anual de 1200 mm, concentrada nos meses de verão (Nimer, 1972). De acordo com os registros da estação meteorológica da Ilha do Governador, gerida pela Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro GEO-RIO, as precipitações podem chegar a 200 mm em 24h, favorecendo a erosão hídrica.

As investigações de campo na área de estudos, com vistas à interpretação geológica das exposições de sedimentos, foram realizadas tendo como base o mapeamento geológico de CPRM (2016), efetuado a partir dos trabalhos de Penha *et al.* (1979), Dalcomo *et al.* (1982) e Ferrari (2001). Este último analisou três pontos dentro de um raio de 1 km da área de estudos, próximos ao muro de divisa da área patrimonial do aeroporto, relacionando-os à Formação Macacu. A Figura 1 apresenta a localização da área, bem como a distribuição das exposições da Formação Macacu no entorno da Baía de Guanabara, a partir do CPRM (2016) e dos pontos descritos por Ferrari (2001) no entorno no aeroporto.

Ferrari (2001) reconheceu doze fácies sedimentares na Formação Macacu, relacionando-as geneticamente a três associações: lacustre; de lobos de fluxo de detritos/lama e fluxo em lençol; de canal fluvial entrelaçado, com afogamentos episódicos. Propôs também os membros Rio Vargem (lacustre), Porto das Caixas (leques aluviais e canais fluviais entrelaçados com afogamentos episódicos), e Conglomerado Itambí (relacionado a ambiente de canais fluviais entrelaçados). Na Ilha do Governador, mapeou exposições relacionadas ao Membro Porto de Caixas e características da Associação de fácies C atinente a processos deposicionais do tipo canal fluvial entrelaçado com afogamentos episódicos.

O Perfil 11, referente ao Ponto 24 mapeado por Ferrari (2001), adjacente ao muro do aeroporto na Praia de Tubiacanga (Figura 1), situa-se em face oposta da mesma colina original da área de estudo, o que restou evidenciado pela visualização das exposições nos taludes. O perfil pode ser descrito sinteticamente como uma sequência fácies de lamitos laminados à maciços sobrepostos por arenitos com estratificação cruzada acanalada a maciços capeados por sedimentos relacionados ao período quaternário.

Para a execução do presente estudo, selecionou-se a face do talude voltada para as pistas de pouso e decolagem do aeroporto, com orientação NNO-SSE, onde foi observada intensa erosão, ocasionando a presença de sulcos e voçorocas (Figura 2). Optou-se pelo local por se tratar de trecho onde as diferentes fácies se apresentam expostas com acesso para coletas de amostras e execuções de ensaios de campo.

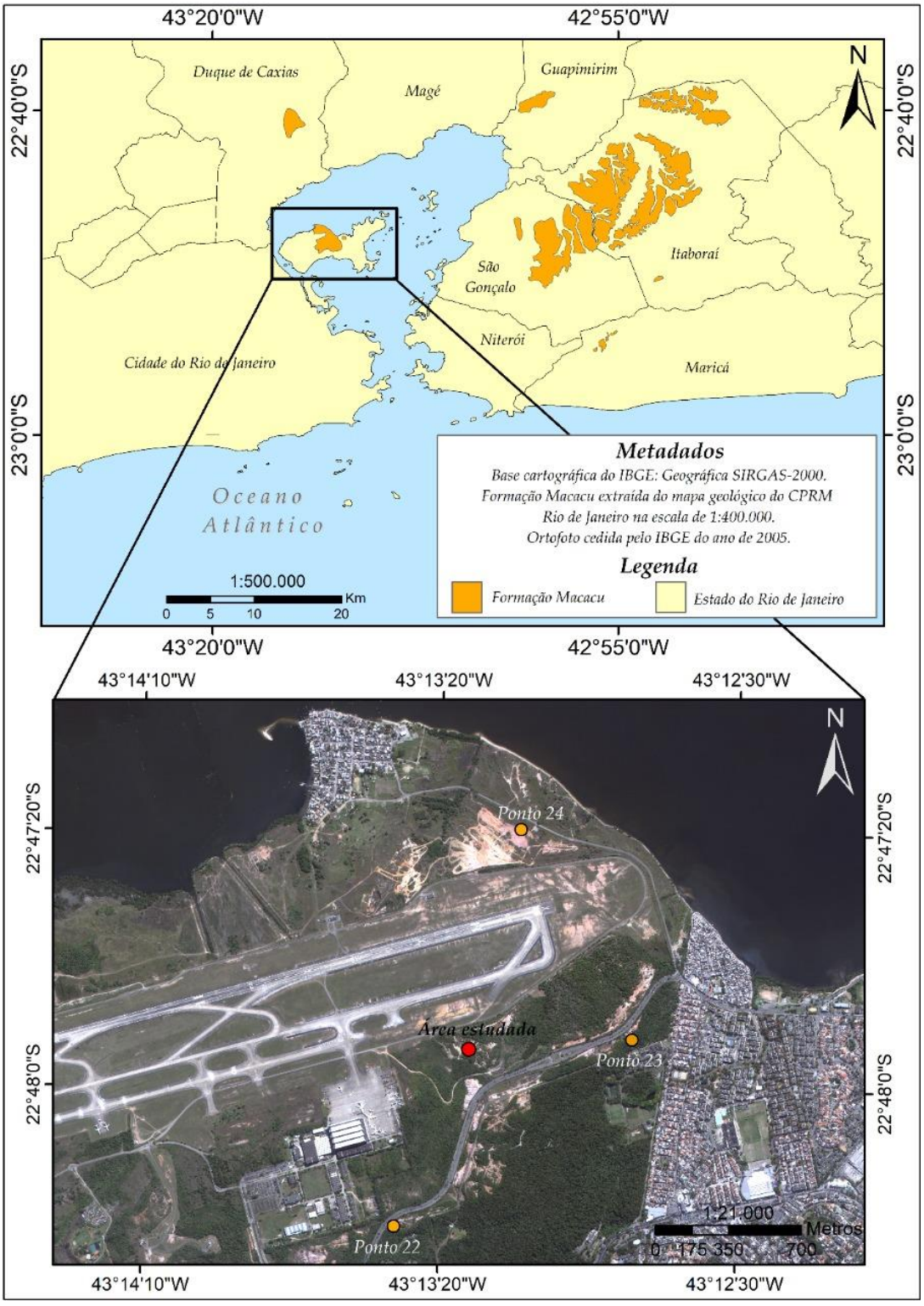

Figura 1. Mapa de localização da área de estudos com a distribuição das exposições da Formação Macacu no entorno da Baía de Guanabara, a partir de CPRM (2016) e dos pontos descritos por Ferrari (2001).

Figura 2. Visão geral da área de estudos.

3. Materiais e Métodos

A caracterização faciológica foi feita a partir da descrição de aspectos do arcabouço, matriz e cimento presentes a partir da granulometria, cor (a partir da carta de Munsell), composição mineralógica, das estruturas presentes e das geometrias das camadas. Para a nomenclatura de identificação das fácies, utilizou-se método adaptado de Miall (1977), buscando-se estabelecer paralelo com outros estudos sobre depósitos da Formação Macacu (Ferrari, 2001; Walter *et al.*, 2011; Percílio *et al.*, 2014; Fiuza, 2015), e sobre outros depósitos sedimentares paleogênicos correlacionáveis (Morais *et al.*, 2006; Barboza *et al.*, 2008; Costa, 2010; Teramoto *et al*., 2019).

Blocos indeformados foram coletados de cada uma das fácies identificadas para a execução de ensaios laboratoriais. Foram realizadas análises granulométricas e mineralógicas, além de ensaios de permeabilidade em campo e em laboratório, avaliações do tamanho e da distribuição dos espaços porais e ensaios de erodibilidade.

Os ensaios granulométricos foram realizados seguindo-se as metodologias preconizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1984; 1986): preparação de amostras para ensaios de caracterização - NBR 6457/1986; análise Granulométrica por peneiramento e sedimentação - NBR 7181/1984. As fácies reconhecidas foram classificadas utilizando-se a nomenclatura de Folk (1974) a partir dos diagramas ternários de classificação de rochas sedimentares de Shepard (1954) e Folk (1954 e 1974). Obteve-se o grau de seleção a partir do cálculo do desvio padrão gráfico inclusivo (σ_I), com os dados de Φ5, Φ 16, Φ 84 e Φ 95 através da fórmula de Folk (1980) conforme mostra a Eq. (1):

$$\sigma I = \frac{\Phi 84 - \Phi 16}{4} + \frac{\Phi 95 - \Phi 5}{6.6}_{s} \quad (1)$$

onde Φ 5, Φ 16, Φ 84 e Φ 95, obtidos graficamente a partir das curvas granulométricas, constituem os diâmetros abaixo dos quais se situam 5%, 16%, 84% e 95%, respectivamente, em peso, das partículas.

As análises mineralógicas consistiram em avaliações para a fração grosseira e a fração fina (silte e argila). Para a avaliação da fração grosseira, utilizou-se material retido na peneira #200, analisado com lupa binocular e microscópio petrográfico. Nestas análises, fez-se a identificação dos componentes minerais, seu grau de alteração e forma dos grãos.

Para a caracterização qualitativa da fração fina (silte e argila), os materiais estudados foram avaliados mediante ensaios de difração de raios-X. Na preparação das amostras, recorreu-se ao método do pó (amostra não orientada e sem tratamento) e lâminas orientadas. Nestas últimas, as amostras foram dispostas em lâminas delgadas e submetidas a tratamentos, por aquecimento a 540°C, e por glicolagem, submetendo-se a amostra à atmosfera de etilenoglicol, por período de 24 horas.

Os ensaios de permeabilidade em campo, foram executados utilizando-se o Permeâmetro de Guelph nos mesmos pontos de coleta dos blocos de amostras. O permeâmetro, amplamente descrito na literatura (Vieira, 1998; Barboza, 2008; Costa, 2010, entre outros), permite a realização de ensaios de carga constante para medição da permeabilidade saturada (k_{sat}) em campo acima do lençol freático. Na determinação do k_{sat} foram utilizadas as

formulações propostas por Elrick *et al.* (1989) e Reynolds & Elrick (1985). Com os resultados deste ensaio, tornou-se também possível determinar a porosidade (n).

Com vistas a caracterizar o tamanho e a distribuição dos espaços porais, realizaram-se ensaios de porosimetria por injeção de mercúrio. O equipamento possibilita a investigação de poros com diâmetro a partir de 0.0017 mm, sob pressão de 1.7 MPa, até poros de 60 Å, que corresponde à pressão de 212 MPa. Através dos resultados obtidos, traçaram-se gráficos de variação incremental dos diâmetros de poros.

Os ensaios de erodibilidade consistiram em análises de desagregação e dispersividade. No ensaio de desagregação (Fonseca & Ferreira, 1981), afere-se a erodibilidade a partir da observação do comportamento de amostras indeformadas em contato com a água. Para a sua realização, produziram-se, a partir dos blocos indeformados extraídos de cada uma das fácies avaliadas, corpos de prova cúbicos (moldados com 6 cm de lado), os quais foram colocados sobre papel filtro, com pedra porosa em uma bandeja plástica nivelada. Em seguida, colocou-se água até o nível das bases das amostras por período de 30 minutos e o nível da água foi aumentado para 1/3 e 2/3 da altura das amostras, prosseguindo até submersão total, mantendo-se entre cada uma dessas fases intervalos de 15 minutos. Após a submersão total, o ensaio prosseguiu por período de 24 horas.

No ensaio de dispersividade, proposto inicialmente por Rallings (1966, *apud* Sherard *et al.*, 1976), a erodibilidade é aferida a partir da observação das reações dos materiais estudados, embebidos em solução alcalina de hidróxido de Sódio (NaOH), com o objetivo de avaliar a influência do meio dispersor. Para a sua execução, utilizou-se solução de hidróxido de sódio (NaOH) na concentração de 1 0.01N. Colocaram-se em copo becker as amostras na forma de torrões e em umidade natural, com diâmetro efetivo entre 6 e 10 mm, durante intervalo de tempo de 5 min. Determinaram-se os graus de dispersividade de acordo com a proposta de Sherard & Dunnigan (1976). O Grau I representa amostras em que fragmentos se desmancham, espalhando-se suavemente pelo fundo do copo becker, sem, no entanto, apresentar sinal de turbidez causada por partículas coloidais na suspensão, isto é, não ocorre nenhuma reação. O Grau II representa amostras nas quais ocorre reação fraca, ou seja, turbidez incipiente ou inexpressiva, na superfície dos fragmentos. O Grau III traduz amostras com reação moderada, com a formação de nuvem de partículas coloidais, facilmente reconhecível na suspensão, normalmente espalhando-se em camadas tênues pelo fundo do copo becker. O Grau IV exprime amostras nas quais ocorre reação forte, com a nuvem de partículas coloidais, cobrindo quase todo o fundo do copo becker como uma fina película.

As descrições faciológicas, incluindo análises texturais e mineralógicas, associadas aos ensaios de permeabilidade, porosimetria e erodibilidade, visaram o estabelecimento de modelo de comportamento hidro-erosivo. Para a geração deste modelo, buscou-se o estabelecimento de padrões e zonas de comportamento hidro-erosivo homogêneo, com mecanismos específicos observáveis, de maneira análoga ao conceito de hidrofácies utilizado em estudos hidráulicos sobre depósitos sedimentares correlacionáveis (Barboza *et al*., 2008; Costa, 2010; Teramoto *et al*., 2019).

4. Resultados e discussão

Foram reconhecidas cinco diferentes fácies sedimentares, sendo duas lamosas e três arenosas. As fácies lamosas são representadas por lamitos arenosos da fácies *La1*, e lamitos argilosos da fácies *La2* (Figuras 3a e 3b), sendo capeadas por um *duricrust* ferruginoso/aluminoso (hematita e gibsita) com espessura entre 3 e 10 cm (Figura 3c). As fácies arenosas são compostas por arenitos com estratificação cruzada acanalada nas fácies *Aca1* e *Aca2* e arenitos grossos maciços na fácies *Am* (Figuras 3d, 3e e 3f). A delimitação das diferentes fácies e o perfil de onde foram coletadas amostras e realizados ensaios de campo encontram-se ilustrados na Figura 4.

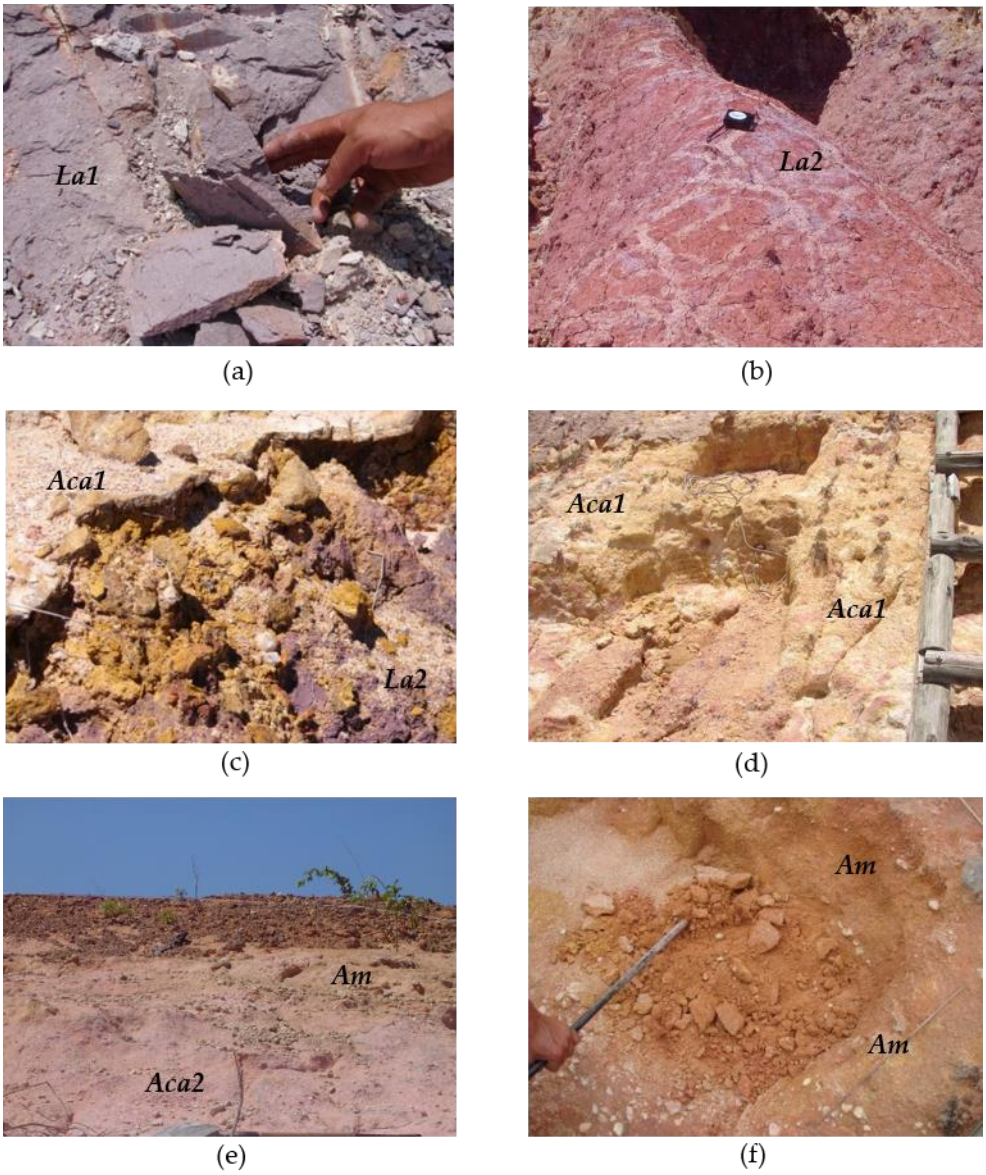

Figura 3. Identificação das diferenças entre as fácies sedimentares reconhecidas no talude: (a) lamitos arenosos da fácies *La1*; (b) lamitos argilosos da fácies *La2*; (c) transição entre as fácies lamosas e arenosas marcada pela presença de *duricrust* ferruginoso/aluminoso; (d) arenitos com estratificação cruzada acanalada da fácies *Aca1;* (e) arenitos com estratificação cruzada acanalada da fácies *Aca2*, e a transição com os arenitos grossos maciços da fácies *Am* (f).

Figura 4. Delimitação das diferentes fácies sedimentares reconhecidas no talude e localização do perfil de onde foram coletadas amostras.

As fácies lamosas formam depósitos tabulares a lenticulares com estratos de porte médio (30 a 50 cm), e associam-se à deposição por suspensão em áreas de baixa energia. As fácies de sedimentos mais grossos encontram-se bruscamente a elas sobrepostas, em contato não erosivo, marcado pela presença de um *duricrust* ferruginoso/aluminoso (hematita e gibsita), formando depósitos tabulares a lenticulares típicos de canal, com pacotes de espessura variando de métrica a 3 m, caracterizando ambiente deposicional de canais fluviais entrelaçados. A organização das fácies em ciclos granodecrescentes associada à existência de fácies arenosas com estratificação cruzada acanalada, linhas de seixos de quartzo e *duricrusts* são características bastante similares às encontradas tanto nos depósitos adjacentes, dentro da Ilha do Governador, descritos por Ferrari (2001), como em outros depósitos da Formação Macacu (Walter *et al.*, 2011; Percílio *et al.*, 2014; Fiuza, 2015).

A descrição das fácies sedimentares foi feita tendo como base os dados das curvas de distribuição granulométrica, seus resultados analíticos e os resultados das análises mineralógicas das frações fina e grosseira. As curvas de distribuição granulométrica das fácies em avaliação, bem como seus resultados analíticos, são apresentadas na Figura 5 e na Tabela 1 respectivamente.

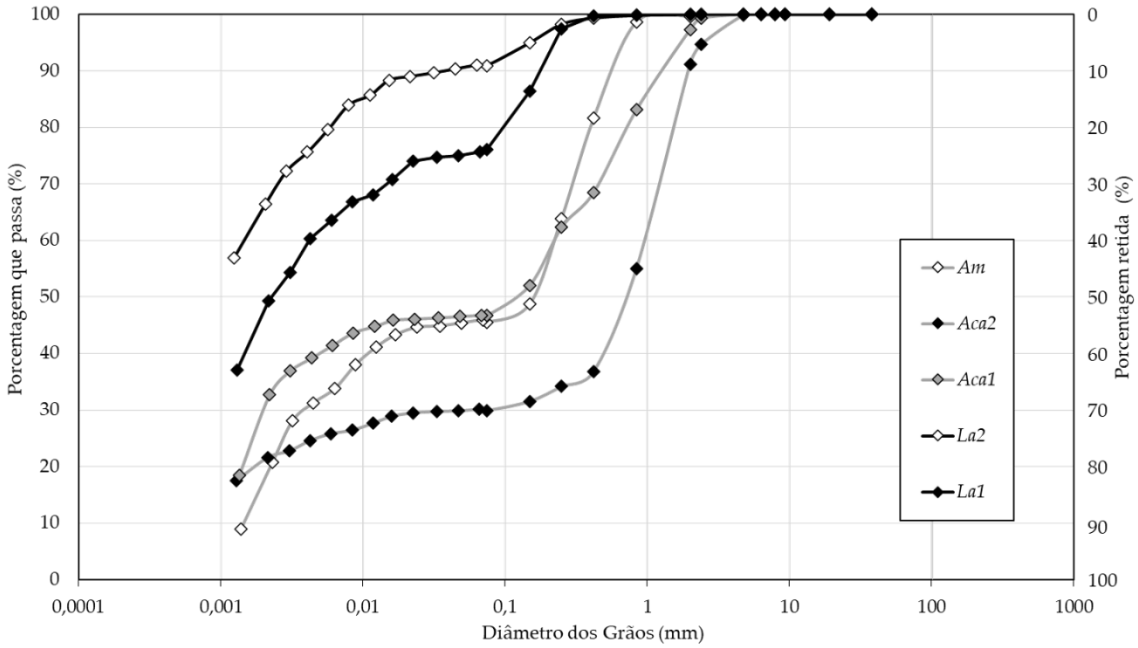

Figura 5. Curvas de distribuição granulométrica das diferentes fácies sedimentares.

Tabela 1. Resultados analíticos das análises granulométricas das diferentes fácies sedimentares.

Índice Granulométrico	**Fácies**				
Granulometria (%)	***Am***	***Aca2***	***Aca1***	***La2***	***La1***
Pedregulho	8,8	2,7	0,4	0	0
Areia Grossa	46,6	22,5	10,7	0,4	0,2
Areia Média	11,7	17,5	32,5	2,9	7,8
Areia Fina	2,8	10,6	10,7	5,7	16,6
Silte	9,1	17,3	28,8	25,1	28,6
Argila	20,9	29,4	16,9	65,8	46,9
σI (Φ) (Folk, 1980)	0,50	1,00	2,25	5,50	4,00

As fácies lamosas correspondem a Lamitos com laminação plano-paralela à maciços, com formação atribuída à deposição por suspensão em áreas de baixa energia, tal como descrito para a fácies *Llm* em Ferrari (2001). As duas fácies lamosas, de Lamitos Arenosos (*La1*) e Lamitos Argilosos (*La2*), foram individualizadas em função da textura e composição.

A Fácies *La1* corresponde a Lamito arenoso (sM), com coloração variegada, composta de vermelho claro acinzentado (2,5YR 6/2), vermelho acinzentado (10R 5/2) e branco (5Y 8/2 e 8/1), devido à presença de feldspato potássico caulinizado e à ferruginização, formando precipitados de ferro e manganês. A fácies apresentou textura muito mal selecionada, indicando baixa maturidade. A fração grosseira, bastante expressiva (24,5%), é composta de quartzo hialino anguloso (indicando proximidade das áreas fonte), 10-15% de concreções argilo-ferruginosas, 1,5 a 2% de feldspatos caulinizados e traços de hidromica e estaurolita (Figura 6a). A fração fina, que representa a matriz, apresentou predomínio de argilominerais do grupo da caulinita (Figura 6b).

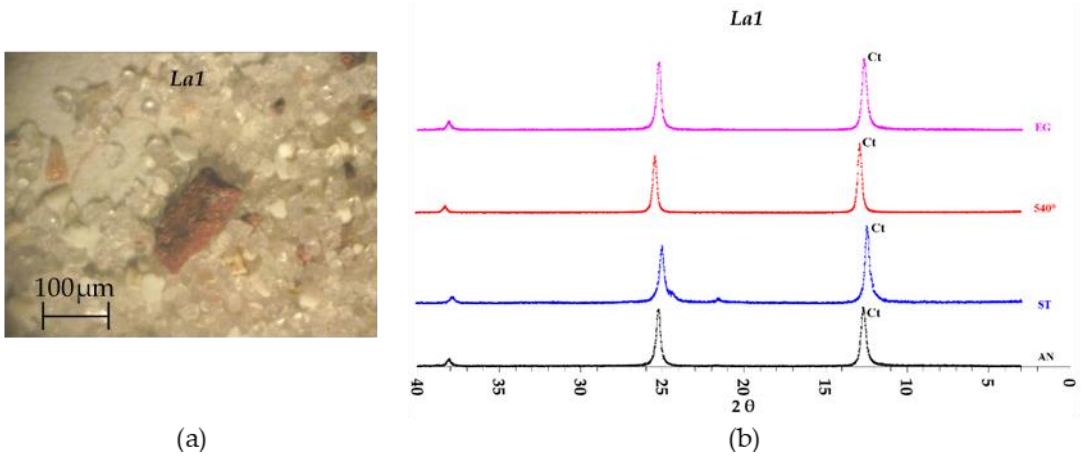

Figura 6. Análises mineralógicas da fácies *La1:* (a) observação das areias por lupa binocular; (b) difratogramas dos ensaios pelo método do pó (AN), lâminas delgadas sem tratamento (ST), com aquecimento (540°), com glicolagem (EG).

A Fácies *La2* corresponde a Argilito (C). Apresenta textura mais fina em relação a *La1*, com forte mosqueamento por ferruginização, coloração variegada composta de vermelho (10R 4/8), amarelo avermelhado (5YR 6/6) e vermelho claro acinzentado (10R 6/2). São sedimentos muito mal selecionados, com distribuição granulométrica unimodal. A fração grosseira apresentou predomínio de quartzo hialino anguloso, com 15 a 20% de agregados argilo-ferruginosos, em torno de 1% de feldspatos caulinizados, além de traços de hidromica, turmalina, biotita e ilmenita (Figura 7a). A fração fina, concentrada nas argilas, chega a mais de 90% da fácies, sendo, assim como a fácies *La1*, composta por argilominerais do grupo da caulinita (Figura 7b).

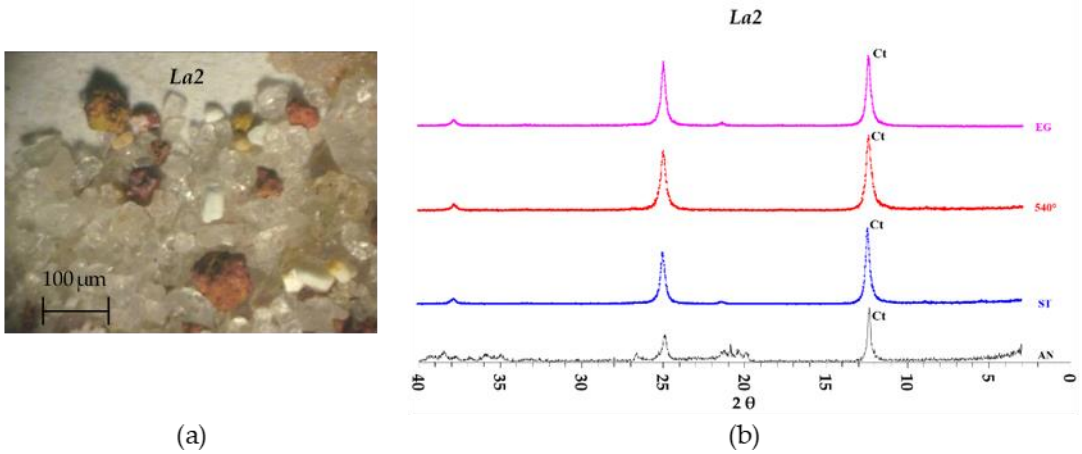

Figura 7. Análises mineralógicas da fácies *La2:* (a) observação das areias por lupa binocular; (b) difratogramas dos ensaios pelo método do pó (AN), lâminas delgadas sem tratamento (ST), com aquecimento (540°), com glicolagem (EG).

A fácies *Aca* corresponde a arenitos com estratificação cruzada acanalada de médio a pequeno porte. Atribui-se a sua formação à migração de barras de crista em regime de fluxo inferior, com a migração de marcas onduladas e o solapamento de margens argilosas por atividade erosiva do canal, sendo as formas de leito preservadas por suspensão (Ferrari, 2001). Subdividiu-se a fácies em duas variedades, *Aca1* e *Aca2*, em função da textura e composição.

A Fácies *Aca1* pode ser classificada como Arenito Siltoso (*mS*), sedimentos muito mal selecionados, com curva de distribuição granulométrica bimodal, caracterizando baixa maturidade textural. Apresentam-se bastante ferruginizados com coloração variegada composta de rosado (7YR 7/3), amarelo claro acinzentado (5Y 8/3) e branco (5Y 8/1), influenciada pela precipitação de óxi-hidróxidos de ferro como a hematita e a goethita. O arcabouço é constituído por areias concentradas na fração média, compostas predominantemente por quartzo hialino, ora milonitizado, ora subarredondado, alguns corroídos, em torno de 1% de concreções argilo-ferruginosas, em torno de 1% de feldspato caulinizado, e traços de hidromica e estaurolita (Figura 8a), indicando relativa distância da área fonte. O teor de finos é elevado (46,1%), concentrado na fração silte (28,8%), indicando seu caráter pós-deposicional e evidenciando a importância da matriz. Esta última, constituída por argila detrítica, apresenta caulinita como principal argilomineral (Figura 8b), o que indica a caolinização de feldspatos e a presença de matriz predominantemente do tipo epimatriz, resultante da alteração de grãos do arcabouço e posterior infiltração do material argiloso no espaço poroso, conforme destacado por vários autores Morais *et al.* (2006), Costa (2010), Percílio *et al.* (2014) e Fiuza (2015).

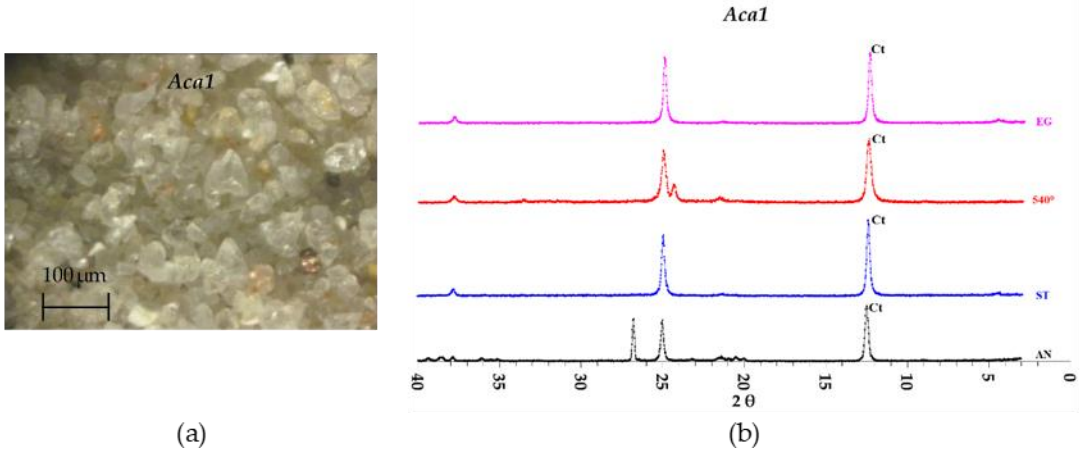

Figura 8. Análises mineralógicas da fácies *Aca1:* (a) observação das areias por lupa binocular; (b) difratogramas dos ensaios pelo método do pó (AN), lâminas delgadas sem tratamento (ST), com aquecimento (540°), com glicolagem (EG).

A Fácies *Aca2* corresponde a Arenito lamoso levemente conglomerático (*(g)mS*). Apresenta-se também ferruginizado, com coloração variegada, composta de amarelo avermelhado (5YR 6/6) e branco rosado (5YR 8/2), devido a presença do cimento hematítico formado em ambiente de sedimentação mais seco. São sedimentos pobremente selecionados com curva de distribuição granulométrica bimodal. A fração grosseira apresentou composição mineralógica similar a fácies *Aca1*, porém com maior concentração de concreções argilo-ferruginosas, chegando a 5% (Figura 9a). O teor de finos é elevado (46,7%), concentrado na fração argila (29,4%), formando expressiva epimatriz de composição mineralógica similar a fácies *Aca1* (Figura 9b).

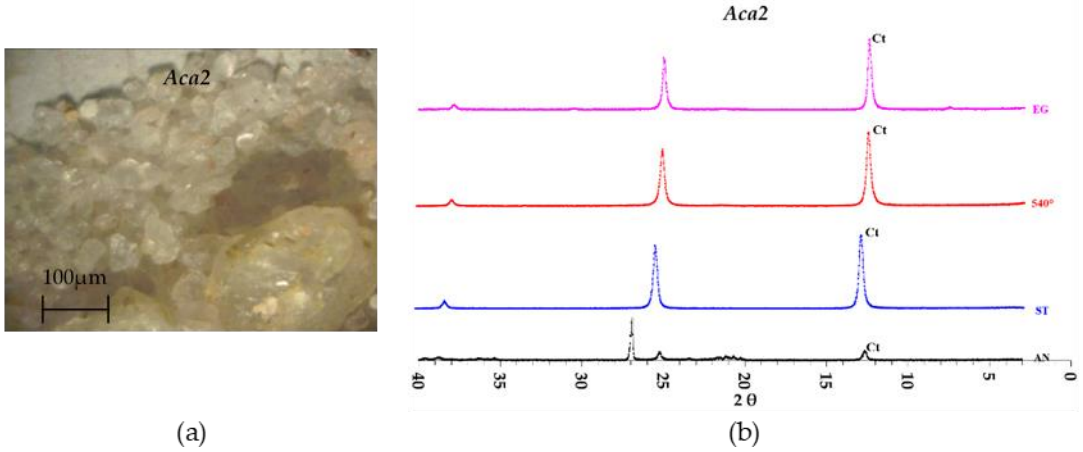

Figura 9. Análises mineralógicas da fácies *Aca2:* (a) observação das areias por lupa binocular; (b) difratogramas dos ensaios pelo método do pó (AN), lâminas delgadas sem tratamento (ST), com aquecimento (540°), com glicolagem (EG).

A Fácies *Am* corresponde a arenitos grossos maciços ou sem estrutura aparente. Atribui-se sua formação à deposição por fluxos não confinados ou por fluxo de detritos, em áreas de baixa energia, conforme descrito por Ferrari (2001). Apresenta-se também bastante ferruginizado, com coloração variegada, composta de amarelo avermelhado (7,5YR 8/6), amarelo (10YR 7/6) e bruno forte (7,5YR 4/6). São sedimentos moderadamente selecionados que apresentam curva de distribuição granulométrica com leve bimodalidade, podendo ser classificados como Arenito lamoso conglomerático (*gmS*). A fácies apresenta teor de pedregulhos superior às demais (8,8%), concentrados em linhas de seixos de quartzo arredondados na sua base, o que indica antigo nível de leito fluvial. As areias, predominantemente grossas, são compostas de quartzo hialino com fragmentos bem angulosos e inclusões de óxido de ferro hialino milonitizado e corroído, além de raros grãos de granada almandina, turmalina, concreções argilosas e argilo-ferruginosas, feldspato caulinizado, ilmenita e hidromica (Figura 10a). Os fragmentos de quartzo hialino angulosos sugerem proximidade com as áreas fonte. A fração fina forma também expressiva epimatriz; as análises dos difratogramas revelaram predomínio de argilominerais do grupo da caulinita, porém os resultados da lâmina delgada com tratamento por glicolagem indicaram a presença, em menores proporções, de esmectitas provenientes da alteração do material micáceo existente no arcabouço (Figura 10b).

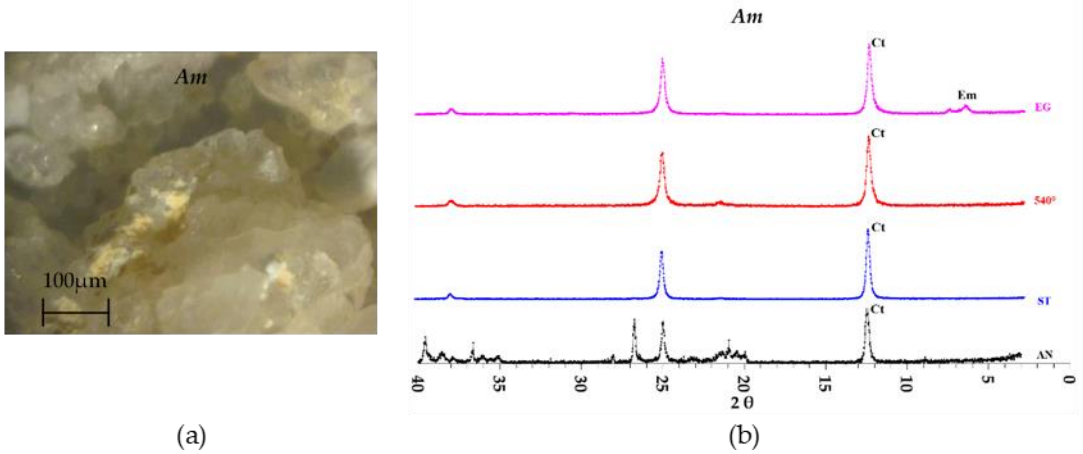

Figura 10. Análises mineralógicas da fácies *Am:* (a) observação das areias por lupa binocular; (b) difratogramas dos ensaios pelo método do pó (AN), lâminas delgadas sem tratamento (ST), com aquecimento (540°), com glicolagem (EG).

Utilizando-se o diagrama ternário de classificação de arenitos de Folk (1980), as fácies arenosas poderiam ser classificadas como quartzoarenitos (*Aca1* e *Am*) ou sublitarenitos (*Aca2*). Porém, se for atribuída a feldspatos grande parte dos argilominerais que compõe a epimatriz, é possível inferir que as amostras seriam classificadas como arcóseos, arcóseos líticos e subarcóseos, caracterizando baixa maturidade composicional, tal como discutido por Fiuza (2015).

Os resultados dos ensaios para determinação da permeabilidade pelos permeâmetros de Guelph e de carga constante, assim como as porosidades totais obtidas a partir dos ensaios de carga constante, se encontram na Tabela 2. Calculou-se ainda valor médio de permeabilidade saturada para cada fácies analisada.

A permeabilidade medida através dos ensaios pelo Permeâmetro de Guelph foi quase sempre maior do que a encontrada nos ensaios de carga constante em laboratório, à exceção da fácies *Aca1*, o que já era esperado, tendo em vista efeitos ocasionados por planos de infiltração macroscópicos (porosidade secundária). A fácies *Aca2* apresentou o maior valor de K_{sat} (5.73 x 10^{-4} cm/s) e as demais fácies apresentaram valores em torno de ordem de grandeza inferiores, estabelecendo-se a ordem: *Aca2* > *Aca1* > *Am* > *La2* > *La1*.

Tabela 2. Resultados de Ksat obtidos a partir de diferentes ensaios de permeabilidade (valores em cm/s), valor médio e porosidade total (n).

Fácies	K_{sat} Guelph (cm/s)	K_{sat} Carga Constante (cm/s)	K_{sat} Média (cm/s)	(n)
La1	6.13 x 10^{-6}	2.70 x 10^{-6}	4,41 x 10^{-6}	0.41
La2	1.14 x 10^{-5}	6.60 x 10^{-8}	7,37 x 10^{-6}	0.43
Aca1	4.90 x 10^{-5}	1.20 x 10^{-4}	3,05 x 10^{-5}	0.41
Aca2	5.73 x 10^{-4}	6.80 x 10^{-5}	6,26 x 10^{-4}	0.34
Am	1.47 x 10^{-5}	5.40 x 10^{-5}	3,27 x 10^{-5}	0.38

Os valores de K_{sat} mostraram certa consonância com os encontrados em estudos anteriores sobre materiais correlacionáveis e de textura semelhante. Barboza *et al.* (2008), avaliando as propriedades hidráulicas de fácies da Seção-tipo da Formação Resende, mediante ensaios com permeâmetro de Guelph, encontraram valores similares, de 1.16 x 10^{-5} cm/s para a fácies *Aca*, porém inferiores, de 8.95 x 10^{-8} cm/s, para a fácies *La*. Costa (2010), analisando aspectos sedimentares e hidráulicos de depósitos da Formação Barreiras na porção emersa da Bacia de Campos, encontrou em seus ensaios permeabilidade (Guelph) na ordem de 10^{-5} a 10^{-4} cm/s para a fácies *Aca* e *Am* e de 10^{-5} cm/s para a fácies La. Os autores relataram, no entanto, problemas com o preparo dos furos para execução dos ensaios nos lamitos, possivelmente acarretando em sobrestimava da sua permeabilidade.

Os valores de $K_{sat,}$ obtidos nos ensaios pelo método do permeâmetro de carga constante, relevaram clara distinção entre as fácies arenosas, na ordem de 10^{-4} cm/s a 10^{-5} cm/s, e as lamosas, na ordem de 10^{-6} a 10^{-8} cm/s, estabelecendo-se a seguinte relação: *Aca1* > *Aca2* > *Am* > *La1* > *La2*. Os resultados seguiram tendência semelhante à encontrada por Costa (2010) em ensaios de laboratório com permeâmetro de carga variável, que encontrou valores de 9.55 x 10^{-5} a 1.71 x 10^{-4} cm/s para as fácies *Aca* e *Am* e de 7.61 x 10^{-8} cm/s para a fácies *La*.

Os valores de K_{sat} obtidos a partir da média aritmética permitiram o estabelecimento da seguinte hierarquia de permeabilidade: *Aca2* > *Am* > *Aca1* > *La2* > *La1.* Os resultados são similares aos encontrados por Costa (2010) com relação aos arenitos, que obteve valores médios de 1.40 x 10^{-4} cm/s, enquanto a média estimada para as fácies *Aca1* e *Aca2* foi de 3.05 x 10^{-5} cm/s a 6.26 x 10^{-4} cm/s (Tabela 2). A maior permeabilidade da fácies *Aca2* em relação à *Aca1* está provavelmente atrelada a maior porcentagem de areia grossa. A fácies *Am* apresentou permeabilidade média de 3.27 x 10^{-5} cm/s, enquanto a encontrada por Costa (2010) foi de 2.14 x 10^{-4} cm/s para o mesmo tipo de fácies. A permeabilidade média da fácies *Am* foi similar às demais fácies areníticas, a despeito da granulometria mais grosseira e da presença de cascalho em maior quantidade. As permeabilidades médias obtidas para as fácies lamosas *La1* e *La2*, de 4.41 x 10^{-6} e 7.37 x 10^{-6} cm/s, foram, porém, em torno de uma ordem de grandeza menor do que as encontradas pelo referido autor, de 6.92 x 10^{-5} cm/s, o que reforça a dificuldade de obtenção desta propriedade hidráulica, especialmente em fácies de sedimentos mais finos como lamitos.

Teramoto *et al*. (2019), em caracterização hidroestratigráfica de depósitos sedimentares da Formação Rio Claro em Paulínia, encontrou resultados similares, com valores médios de permeabilidade na ordem de 10^{-6} cm/s para fácies lamosas e entre 10^{-4} e 10^{-5} cm/s para as fácies arenosas. Os dados de permeabilidade média permitiram classificar, de acordo com o critério para sedimentos inconsolidados (Custódio & Llamas, 1983), as fácies arenosas como aquíferos pobres, enquanto as fácies lamosas constituem aquitardos, similar ao encontrado por Costa (2010).

Os valores de porosidade total encontrados, expostos na Tabela 2, mostram que as fácies apresentaram pequenas variações, sendo as fácies lamosas (*n* entre 0.41 e 0.43) tão ou mais porosas em relação às arenosas (*n* entre 0.34 e 0.41), não tendo sido possível estabelecer relação entre porosidade total e permeabilidade. Isto sugere, tal como discutido por Fiuza (2015), que a porosidade neste caso é predominantemente de origem secundária, gerada tanto pela dissolução dos grãos instáveis do arcabouço (feldspatos, micas e fragmentos líticos), quanto pelo processo de expansão e contração da matriz argilosa. A fácies *La2* apresentou estruturas de contração e maior porosidade total, porém com valores de permeabilidade muito baixos, isto é, a estrutura laminar/maciça não permite a permeabilidade, que se dá essencialmente nestes vazios secundários, resultando em formação quase impermeável. A porcentagem de argila das fácies arenosas, entretanto, apresentou correlação inversa com as porosidades, o que indica a importância da matriz no preenchimento dos seus vazios de maneira similar ao descrito por Costa (2010).

Na Figura 11, apresentam-se gráficos de variação do volume de poros em função dos diâmetros para as diferentes fácies em avaliação. Os gráficos mostraram distribuição unimodal nas fácies lamosas, com moda bem definida, correspondente aos poros com em torno de 0.05 μm (Figuras 11a e 11b), e bimodal nas fácies arenosas, com duas modas bem definidas: na fácies *Aca1* ocorrem modas nos 0.1 μm e 30 μm (Figura 11c); na fácies *Aca2*, a primeira moda ocorre para poros de 0.1 μm, e a segunda para os de 11 μm (Figura 11d); e na fácies *Am* a primeira moda ocorre em 0.5 μm e a segunda entre 20 e 98 μm (Figura 11e). A quantidade de modas e o tamanho dos poros correspondentes apresentaram relação direta com as características das curvas de distribuição granulométrica, isto é, os arenitos apresentaram em ambos os parâmetros bimodalidade, sendo o volume dos poros predominantes maior para texturas mais grosseiras.

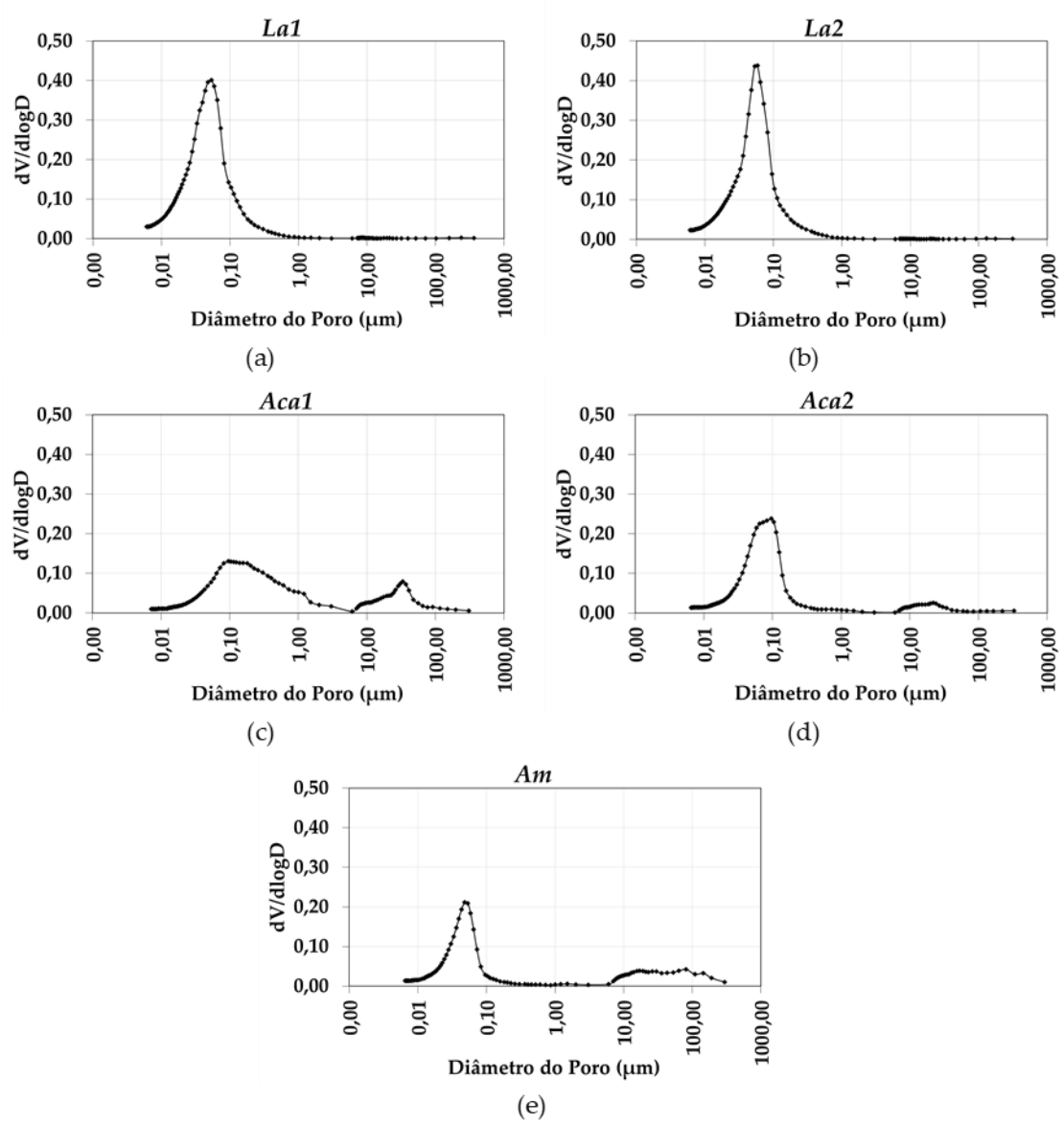

Figura 11. Variação incremental dos volumes porais em função dos diâmetros para as fácies *La2*, *La1*, *Am*, *Aca2* e *Aca1* (a, b, c, d, e, respectivamente).

Os maiores valores de permeabilidade das fácies arenosas podem ser considerados atrelados à presença da segunda moda de poros de diâmetro superior, sem que tenha sido possível estabelecer relação direta entre o percentual volumétrico dos diferentes diâmetros de poros e as permeabilidades obtidas. Isto provavelmente ocorreu em função dos tipos e graus de cimentação presentes nas diferentes fácies, que preencheram os vazios em conjunto com a epimatriz, determinando estes parâmetros e influenciando de maneira decisiva o comportamento hidro-erosivo. Essa cimentação pode ter ocorrido de diferentes maneiras, podendo estar localizada nos contatos das laminações, em forma de nódulos e microagregados dispersos, preenchendo o espaço entre os grãos ou o espaço gerado pela contração da matriz argilosa; ou ainda cimentando e pigmentando a matriz e os próprios grãos feldspáticos e líticos alterados das fácies arenosas. Sob este aspecto, a fácies *Am* apresentou textura grosseira com porcentagem relevante de cascalhos, porém a permeabilidade e a porosidade são baixas, o que indica pouca conectividade entre os poros (porosidade efetiva) em decorrência da presença da matriz argilosa e da cimentação por óxidos e hidróxidos de ferro preenchendo os espaços vazios, que são evidências da ação dos processos pós-deposicionais, a modificar as características permoporosas originais.

Os resultados dos ensaios de desagregação (Figura 12) possibilitaram o estabelecimento da seguinte hierarquia de erodibilidade: *La1* > *La2* > *Am* > *Aca1* > *Aca2*. Apesar da fácies *Am* ter reagido rapidamente nos primeiros 30 minutos, sua desagregação final não se mostrou completa, de modo que seu comportamento se assemelhou às demais fácies arenosas, com desagregabilidade inferior às fácies lamosas. As fácies lamosas, que apresentaram maior desagregabilidade, também se diferenciaram, com a fácies *La1* mostrando maior desagregação desde os primeiros momentos do ensaio aos 30 minutos, quando o corpo de prova sofreu fraturamento seguindo um plano de fraqueza, oriundo possivelmente de uma fratura, laminação ou de uma estrutura de contração. Este resultado, aproximadamente inversamente proporcional à hierarquia de permeabilidade média, apresentou clara correlação com o comportamento hidro-erosivo observado em campo. Conforme se vê na Figura 13, as erosões formam concavidades e incisões verticais profundas nas fácies lamosas (Figuras 13a e 13b), que aparentam maior erodibilidade, enquanto as fácies arenosas geram saliências com formas tabulares e em totens controlando a erosão local (Figuras 13c e 13d).

Tempo	**Fácies**				
	La1	***La2***	***Aca1***	***Aca2***	***Am***
30 min.					
	Incipiente	Ausente	Ausente	Ausente	Incipiente
45 min.					
	Intensa	Moderada	Incipiente	Incipiente	Moderada
60 min.					
	Quase total	Quase total	Intensa	Intensa	Intensa
24 h					
	Total	Total	Total	Total	Total

Figura 12. Resultados dos ensaios de desagregação (20min, 45min, 60min e 24 horas).

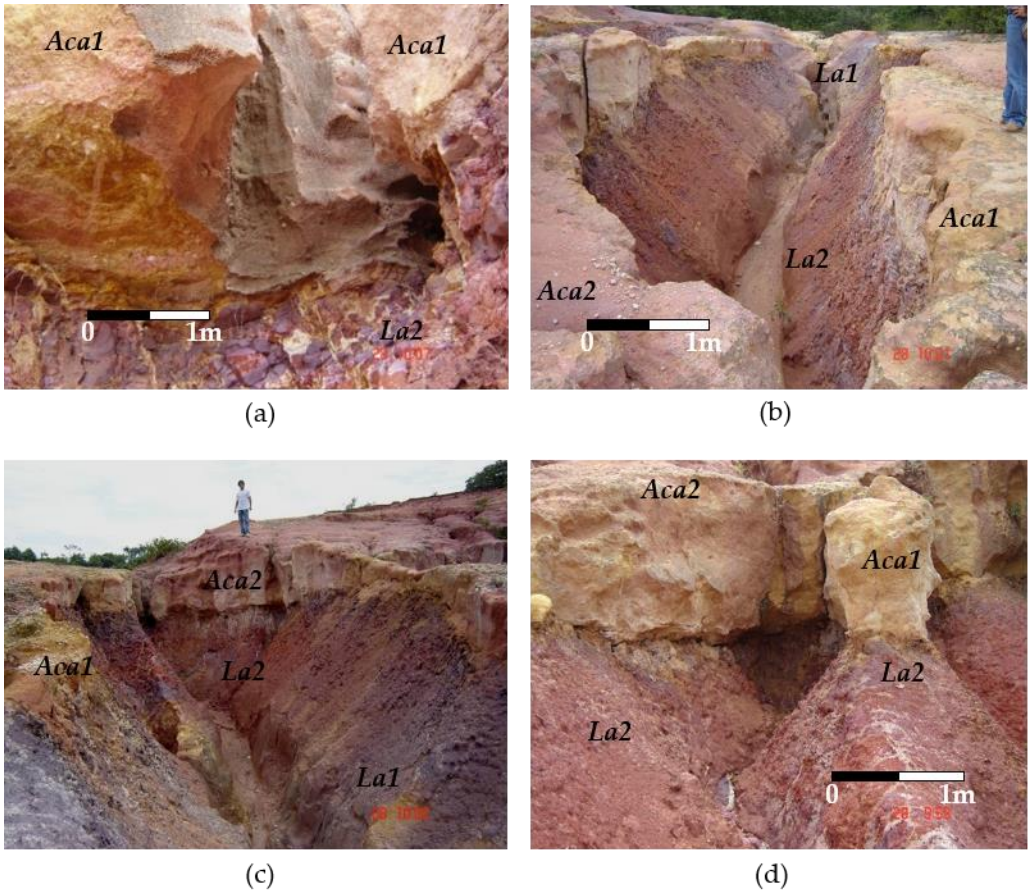

Figura 13. Processos hidro-erosivos aprofundando concavidades (a) e incisões verticais nas fácies lamosas (b) gerando formas tabulares (c) e totens na fácies arenosas (d).

Storgatto *et al*. (2010), ao analisar depósitos da Formação Santa Maria, membro Passo das Tropas, utilizando critério de erodibilidade baseado em ensaios da metodologia MCT, método de avaliação do potencial de desagregação do solo frente à imersão em água bastante semelhante aos ensaios de desagregação, também encontraram comportamento similar, com arenitos grossos a médios de cor rosa/avermelhada com óxidos de ferro e argilas, apresentando-se mais resistentes pela presença do cimento ferruginoso, e fácies de textura mais fina onde se verificam vários processos de erosão. Nagel *et al*. (2009), realizando ensaios de Inderbitzen e Pinhole, atualmente difundidos para solos residuais (Vieira *et al*., 2019), encontraram resultados similares analisando os mesmos materiais. Em seu estudo sobre a erodibilidade de depósitos sedimentares da Formação Macacu através destes mesmos ensaios, Araújo (2000) encontrou resultados divergentes, com maior desagregabilidade de arenitos em relação aos lamitos. Isto indica que o tipo e grau de cimentação dos arenitos exercem papel preponderante em relação à textura no controle da erosão, fazendo com que fácies aparentemente similares apresentem comportamento hidro-erosivo diferente, reforçando necessidade de ensaios de dispersividade como chave para a sua compreensão.

Nas avaliações sobre a influência do meio dispersor sobre as amostras, observou-se divisão clara entre as fácies lamosas e as fácies arenosas. As fácies lamosas não apresentaram reação, podendo ser classificadas como Grau I, tendo ocorrido a concentração de alguns fragmentos no fundo do copo becker, sem, no entanto, apresentar qualquer sinal de turbidez causada por partículas coloidais na suspensão. As fácies arenosas foram todas classificadas como Grau IV, apresentando reação forte, com a formação de nuvem de colóides cobrindo todo o fundo do copo becker e tornando a solução do copo bastante turva. Isto é, uma vez colocados na presença de agente dispersor, os arenitos se desfazem, enquanto nada ocorre com os lamitos, o que sublinha a importância dos

cimentos nos arenitos preenchendo e consolidando os espaços entre arcabouço e matriz, garantindo a floculação dos argilominerais presentes e controlando a erodibilidade.

A similaridade composicional, textural, das características permoporosas e da erodibilidade das fácies *Aca1*, *Aca2* e *Am*, e a relativa distinção com as das fácies *La1* e *La2* possibilitaram a definição de duas zonas de comportamento hidro-erosivo homogêneo com mecanismos específicos observáveis. A Figura 14 expõe este modelo detalhando as fácies envolvidas e as feições relevantes.

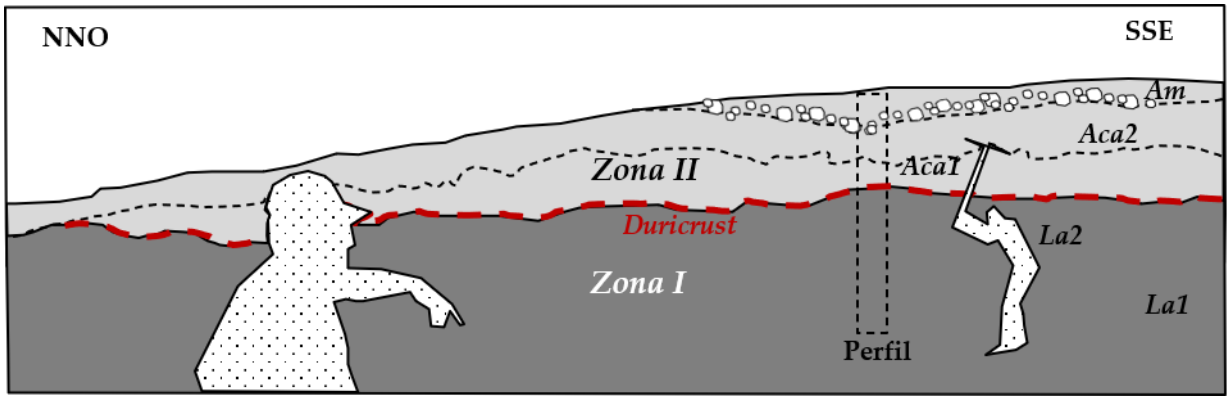

Figura 14. Zonas de comportamento hidro-erosivo homogêneo. O tracejado vermelho representa o *duricrust*.

A Zona I é constituída pelos lamitos arenosos a argilosos das fácies *La1* e *La2*, apresentando permeabilidade média de 5.07 x 10^{-6} cm/s com pequenas variações (entre 4.41 e 7.37 x 10-6 cm/s) e porosidade total média de 0.42, concentrada em moda de poros. São sedimentos muito mal selecionados, com distribuição granulométrica unimodal, uma fração fina chegando a mais de 90%, composta por argilominerais do grupo da caulinita e uma fração grosseira com predomínio de quartzo hialino anguloso, indicando baixa maturidade textural. Classifica-se como aquitardo, com elevada desagregabilidade em água e nenhuma reação ao meio dispersor (Grau I). Estas fácies formam zona de comportamento hidro-erosivo mais erodível e menos permeável em relação às fácies arenosas, gerando concavidades e incisões verticais profundas, em alguns casos seguindo planos de fraturamento, laminação, ou estruturas de contração, o aprofundamento dos sulcos e o desenvolvimento de voçorocamentos.

O *duricrust* ferruginoso/aluminoso capeia as fácies lamosas e controla a infiltração, formando impedimento hidráulico. Apesar da baixa erodibilidade, esta cobertura se encontra em meio ao perfil estratigráfico, aparecendo somente lateralmente na forma e uma camada de poucos centímetros, com em torno de 3 cm de espessura, não se evidenciando de maneira expressiva em superfície, de modo que não se considerou relevante sua influência sobre o comportamento hidro-erosivo junto ao conjunto em análise.

A Zona II é constituída pelos arenitos siltosos a lamosos, com estratificação cruzada acanalada das fácies *Aca1* e *Aca2*, e pelos arenitos grossos maciços da fácies *Am.* São sedimentos muito pobremente a moderadamente selecionados, textura bimodal, com expressiva porcentagem de finos compondo a matriz. A permeabilidade média é de 1.46 x 10^{-4} cm/s, com variações na ordem de 10^{-5} a 10^{-4}, chegando a duas ordens de grandeza superior em relação à Zona I. A porosidade total média é de 0.38, com poros concentrados em duas modas, sendo os poros de maior diâmetro relacionados a maior porosidade efetiva. Classifica-se como aquífero pobre, com menor desagregabilidade em relação às fácies lamosas, e também forte reação ao meio dispersor (Grau IV), o que ressalta a importância do cimento diagênico, preenchendo e consolidando os espaços entre arcabouço e matriz, no controle da erodibilidade destas fácies. Assim, o conjunto de fácies que forma esta zona se mostra menos erodível, formando patamares e totens acima dos lamitos e controlando a erosão local, que inicia seu caminho através de sulcos estreitos e profundos que, quando atingem os lamitos, se expandem e avançam até maiores profundidades.

As duas zonas de comportamento hidro-erosivo homogêneo, constituídas pelos lamitos e arenitos, apresentaram características permoporosas médias muito similares às obtidas para hidrofácies correlacionáveis. Os valores de permeabilidade média das fácies, com variações na ordem de 10^{-5} a 10^{-4} cm/s para as fácies arenosas e na ordem de 10^{-6} cm/s para as lamosas, são similares aos obtidos por Costa (2010), com variação na ordem de 10-

^{4} a 10^{-5} e de 10^{-5} a 10^{-8} cm/s, e por Teramoto *et al*. (2019), com variação na ordem de 10^{-4} a 10^{-5} e de 10^{-5} a 10^{-8} cm/s, respectivamente. Os valores também corroboram a faixa de valores para materiais areno-argilosos e argilosos inconsolidados segundo Fetter (2001), de 10^{-4} a 10^{-6} e de 10^{-6} a 10^{-8} cm/s. Os valores de porosidade total (~aparente), com média de 0.38 e 0.42, foram inversamente proporcionais aos de permeabilidade, isto é, a maior porosidade das fácies lamosas, relacionada à porosidade secundária por encolhimento do material argiloso, não confere transmissividade à estrutura maciça/laminada.

A delimitação das duas zonas em termos de erodibilidade apresentou igualmente grande concordância com padrões observados em estudos anteriores sobre depósitos correlacionáveis, como os de Nagel *et al*. (2009) e Storgatto *et al*. (2010), que destacaram a maior resistência à erosão dos arenitos devido à presença do cimento ferruginoso em relação à maior erodibilidade de fácies de textura mais fina associadas, nas quais se verificaram vários processos de erosão. Este comportamento é muito semelhante ao descrito para as fácies que compõem as duas zonas, a partir dos ensaios de desagregação, mais intensa nas fácies lamosas, e de dispersividade, com maior grau de dispersão dos arenitos diretamente relacionado à cimentação (óxi-hidróxidos de Fe, Mn), a conferir menor erodibilidade.

5. Conclusões

Reconheceram-se no talude cinco diferentes fácies sedimentares, lamitos arenosos e argilosos das fácies *La1* e *La2*, arenitos com estratificação cruzada acanalada das fácies *Aca1* e *Aca2*, e arenitos maciços da fácies Am. As fácies lamosas formam depósitos tabulares a lenticulares de porte médio associados à deposição por suspensão em áreas de baixa energia, enquanto as arenosas encontram-se bruscamente sobrepostas, em contato não erosivo marcado por *duricrusts*, formando depósitos tabulares a lenticulares típicos de canal, confirmando o ambiente deposicional de canais fluviais entrelaçados, correlacionado ao Membro Porto de Caixas. Os arenitos apresentaram elevado teor de finos, evidenciando a importância da matriz e indicando seu caráter pós-deposicional. A caulinita foi o principal argilomineral encontrado em ambas as fácies, no caso dos arenitos provenientes da caolinização de feldspatos, evidenciando uma epimatriz, resultante da alteração de grãos do arcabouço e posterior infiltração do material argiloso no espaço poroso, conforme anteriormente destacado por vários autores para depósitos da Formação Macacu.

Os ensaios com o permeâmetro de Guelph foram realizados com êxito, independentemente das dificuldades encontradas na preparação dos furos e na sua execução por tempos prolongados devido aos baixos valores de permeabilidade. Os valores foram similares aos encontrados na literatura para os arenitos e superiores para os lamitos, o que pode ter sido ocasionado pela presença da porosidade secundária, por contração, nestes últimos, associada à presença de grande quantidade de finos. Este processo pode estar ocorrendo de maneira mais acentuada próximo à superfície e possivelmente não reflete o comportamento dos materiais como um todo. Nos ensaios pelo permeâmetro de carga constante, as fácies lamosas apresentaram menores valores de permeabilidade em relação aos ensaios de campo, mais semelhantes aos encontrados na literatura em ensaios similares e fácies correlacionáveis.

Os valores de porosidade total das diferentes fácies mostraram pequenas variações, não tendo sido possível estabelecer relação entre porosidade total e permeabilidade, sugerindo porosidade predominantemente secundária nas últimas, gerada pelo processo de expansão e contração da matriz argilosa, enquanto a porcentagem de argila das fácies arenosas apresentou correlação inversa, indicando a relevância da matriz no preenchimento dos vazios.

Nos ensaios de porosimetria por injeção de mercúrio, a quantidade de modas e o tamanho dos poros correspondentes encontrados apresentaram relação direta com as características das curvas de distribuição granulométrica. Os tipos e graus de cimentação presentes nas diferentes fácies determinaram o preenchimento dos vazios em conjunto com a matriz, influenciando de maneira decisiva o comportamento hidro-erosivo.

Os resultados dos ensaios de desagregação possibilitaram o estabelecimento da seguinte hierarquia de erodibilidade: *La1* > *La2* > *Am* > *Aca1* > *Aca2*. Este resultado, aproximadamente inversamente proporcional à hierarquia de permeabilidade média, apresentou clara correlação com o comportamento hidro-erosivo observado em campo. Nas avaliações sobre a influência do meio dispersor sobre as amostras, observou-se divisão clara entre as fácies lamosas e as fácies arenosas. As fácies lamosas não apresentaram nenhuma reação, enquanto as fácies

arenosas apresentaram reação forte, sublinhando a importância dos cimentos nestes últimos, preenchendo e consolidando os espaços entre arcabouço e matriz e controlando a erodibilidade.

A similaridade composicional, textural, das características permoporosas e da erodibilidade das fácies *Aca1*, *Aca2* e *Am*, e a relativa distinção com as das fácies *La1* e *La2* possibilitaram a definição de duas zonas de comportamento hidro-erosivo homogêneo com mecanismos específicos observáveis, de maneira análoga e complementar ao conceito de hidrofácies, possibilitando maior aprofundamento das discussões.

A Zona I, constituída pelos lamitos, representa um aquitardo, mais erodível e menos permeável em relação às fácies arenosas, gerando concavidades e incisões verticais profundas na forma de sulcos e voçorocas, em alguns casos seguindo planos de fraturamento, laminação, ou estruturas de contração. Apesar da baixa erodibilidade, não se considerou relevante o *duricrust* no conjunto em análise. A Zona II, constituída pelos arenitos, representa aquífero pobre com menor erodibilidade em relação à Zona I. Pode-se concluir que grande parte da resistência à erosão das suas fácies resulta da presença do cimento diagênico, hematítico e goethítico, de modo que a zona forma patamares e totens acima dos lamitos e controla a erosão local, que inicia seu caminho por sulcos estreitos e profundos que, quando atingem os lamitos, se expandem e avançam até maiores profundidades.

Contribuições dos Autores: Concepção, pesquisa e escrita, H.P.; preparação de dados, R.R.B.; revisão, supervisão, T. M. P.C. e A.G.A. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Este trabalho foi desenvolvido como parte dos Projetos PRONEX-Rio (E-26/171.544/2006) e CT-Hidro (552842/05). Os autores agradecem o apoio propiciado pelo CNPq em ambos os Projetos, em associação com a FAPERJ no Projeto PRONEX.

Agradecimentos: Os autores agradecem as contribuições dadas pelo pesquisador Franklin dos Santos Antunes (PUC-Rio).

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse. Os financiadores não tiveram interferência no desenvolvimento do estudo; na coleta, análise ou interpretação dos dados; na redação do manuscrito, ou na decisão de publicar os resultados.

Referências

1. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6457/1986.** Amostras de Solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. Rio de Janeiro, 1986.
2. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181/1984.** Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.
3. ALMEIDA, F. F. M. The system of continental rifts bordering the Santos Basin. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 48, (suplemento), p. 15-26, 1976.
4. AMADOR, E. S. Unidades sedimentares cenozoicas do Recôncavo da Baía de Guanabara (Folhas Petrópolis-Itaboraí). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 52, n. 4, p. 744-761, 1980.
5. ARAÚJO, R. DA C. **Estudo da Erodibilidade de Solos da Formação Barreiras – RJ**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2000.
6. BARBOZA, A.C.L.; BREDA, T.C.; JUNIOR, G.C.S.; MELLO, C.L. Análise de fácies sedimentares aplicada à estudos de reservatórios em depósito fluvial da Formação Resende, RJ. In: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 15, 2008, Natal-RN. **Anais...** Natal – RN: ABAS, 2008. p. 1-20.
7. COSTA, M.C.O. da. **Caracterização Integrada de Aspectos Sedimentares e Hidráulicos do Aquífero Barreiras na Porção Emersa da Bacia de Campos, RJ**. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Programa de Pós Graduação em Geologia PPGI. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
8. CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil. **Geologia e recursos minerais do Estado do Rio de Janeiro: texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais**. 1a ed. Belo Horizonte: CPRM, 2016. 182 p.
9. CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R. **Hidrogeologia Subterrânea**. Ed. 1 e 2. Barcelona: Editorial Omega, 1983. 2350p.
10. DALCOLMO, M. T.; FERRARI, A. L.; MELLO, E. F.; VAZ, M. A. A.; BRENNER, T. L.; SILVA, V. P.; NASSAR, M**. Bloco Baía de Guanabara, Folhas: Itaboraí, Baía de Guanabara, Marica e Saquarema**. Niterói: GEOMITEC - DRM/RJ, 1982. Relatório Final.

11. ELRICK, D.E.; REYNOLDS, W.D.; TAN, K.A. Hydraulic Conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analysis. **Groundwater Monitoring Review**, v.9, n.3, p. 184-193, 1989. DOI: 10.1111/j.1745-6592.1989.tb01162.x
12. FERRARI, A. L. **Evolução tectônica do Graben da Guanabara**. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. 412p. DOI: 10.11606/T.44.2001.tde-29082013-152530
13. FETTER, C.W. **Applied Hydrogeology**. 4ª edição. London: Prentice Hall, 2001. 589p.
14. FIUZA, B.O. **Análise faciológica e petrografia de arenitos da Formação Macacu (Membro Porto das Caixas) – Bacia do Macacu RJ**. Trabalho Final de Curso (Graduação em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2015. 52p.
15. FOLK, R.L. The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary rocks. **Journal of Geology**, v. 62, n.4, p. 344-359, 1954.
16. FOLK, R.L. **Petrology of sedimentary rocks**. 2nd Ed. Austin: Hemphill Publishing, 1980. 184p.
17. FONSECA, A. M. C. C. C.; FERREIRA, C. M. S. Metodologia para Determinação de um Índice de Erodibilidade de Solos. **Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia.** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ. ABMS., 1981. p.646-667.
18. MEIS, M. R. M.; AMADOR, E. S. Contribuição ao estudo do Neocenozóico da Baixada da Guanabara: Formação Macacu. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 7, n. 2, p. 124-150, 1977.
19. MEIS, M.R.M.; AMADOR, E.S. Formação Macacu: Considerações a respeito do Neo-Cenozóico da Baía de Guanabara. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 44, n. 3/4, p. 602, 1972.
20. MEIS, M.R.M.; AMADOR, E.S. Note on Weathered Arkosic Beds. **Journal of Sediment Petrology**, v. 44, n. 3, p. 727-737. 1974. DOI: 10.1306/212F6B90-2B24-11D7-8648000102C1865D
21. MIALL, A. D. A review of the braided-river depositional environment. **Earth Science Reviews**, v. 13, n. 1, p. 1-62, 1977. DOI: 10.1016/0012-8252(77)90055-1
22. MORAIS, R. O.; MELLO, C. L.; COSTA, F. O.; SANTOS, P. F. Fácies sedimentares e ambientes deposicionais associados aos depósitos da Formação Barreiras no estado do Rio de Janeiro. **Geologia USP. Série Científica**, v.6, n.2, p. 19-30, 2006. DOI: 10.5327/S1519-874X2006000300004
23. NAGEL, F.; STORGATTO, G.; BASSO, L.; NUMMER, A.V.; Pinheiro, R.J.B. Ensaio Interbitzen: estudo da erodibilidade de solos e rochas sedimentares. In: GeoRS'2009 - V Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul. **Anais...** Pelotas: ABMS, p. 1-9, 2009.
24. NIMER, E. Climatologia da Região Sudeste do Brasil: Introdução à Climatologia Dinâmica - Subsídios à Geografia Regional do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 34, n. 1, p.3-48, 1972.
25. PENHA, M.; FERRARI, A. L.; RIBEIRO, A.; AMADOR, E. S.; PACIULLO, F. V. P.; JUNHO, M. C. B.; BRENNER, T. L. **Projeto Folha Petrópolis**. Rio de Janeiro: Convênio IG/UFRJ – DRM, 1979. Relatório Final.
26. PERCÍLIO, R.R.; BERGAMASCHI, S.; BERTOLINO, L.C. Caracterização faciológica e paleoambiental de depósitos sedimentares da Bacia do Macacu na região de Itambí, Itaboraí, Rio de Janeiro. **Cadernos de Geociências**, v. 11, n. 1-2, p. 7-20. 2014.
27. REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. In situ measurement of filed saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the a-parameter using the Guelph Permeameter. **Soil Science**, v.140, n. 4, p. 292-302, 1985. DOI: 10.1097/00010694-198510000-00008
28. RICCOMINI, C. **O rift continental do sudeste do Brasil**. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade São Paulo, São Paulo, 1989. 256 p. DOI: 10.11606/T.44.1990.tde-18032013-105507
29. RICCOMINI, C.; MODENESI-GAUTTIERI, M.; FERRARI A.L.; HIRUMA S.T.; SANT'ANNA, L.G. Origin and evolution of the continental rift of Southeastern Brazil. In: IUGS, International Geological Congress, 31, Rio de Janeiro. Post-Congress Field Trip Guides. **Anais...** Rio de Janeiro: IUGS, 37p. (AFT10), 2000.
30. RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. G.; FERRARI, A. L. Evolução geológica do rift continental do sudeste do Brasil. In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; et al. (Ed). **Geologia do continente Sul Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. 1ª Ed., São Paulo: Beca Produções Culturais Ltda, p. 383-405, 2004.
31. SHERARD, I. L.; DUNNIGAN, L. P.; Decker, R. S. Identification and nature of dispersive soils. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, v. 102, n. 4, p. 287-301, 1976. DOI: 10.1061/AJGEB6.0000256
32. STORGATTO, G.; SOMAVILA, L DE C.; MALLMANN, K.; NAGEL, F.; SCHNEIDER, P.A.; NUMMER, A.V.; PINHEIRO, R.J.B. Utilização do Critério de Erodibilidade Baseado em Ensaios da Metodologia MCT para Caracterização de Solos e Rochas Sedimentares. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG 2010, **Anais...** Gramado: ABMS, p.1-6, 2010.

33. TERAMOTO, E.H.; KIANG, C.H.; CAETANO CHANG, M.R. Caracterização Preliminar do Aquífero rio Claro em Paulínia/SP. **Geociências**, v. 38, n. 2, p. 575 - 586. 2019.
34. VIEIRA, S.R. Permeâmetro: Novo aliado na avaliação do manejo do solo. **O Agronômico**, v. 50, n.2. p. 32-33, 1998.
35. VIEIRA, L.H.; RODRIGUEZ, T.T.; BARRA, M.F.W. Erodibilidade de Solos Residuais de Feição Erosiva e Mecanismo de Propagação. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 12, p. 30585-30599, 2019. DOI: 10.34117/bjdv5n12-175
36. WALTER, P.; MELLO, C. L.; CHRISMANN, J. V. V.; RODRIGUES, L. O. M. Análise faciológica de depósitos da Formação Barreiras(?) na Região dos Lagos, entre Maricá e Saquarema (Rio de Janeiro). In: XIII ABEQUA Congress - The South American Quaternary: Challenges and Perspectives. **Anais...** Armação de Búzios: ABEQUA, p.1-5, 2011.

Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.