

**RESISTÊNCIA DO SOLO À
PENETRAÇÃO COMO
INFORMAÇÃO
COMPLEMENTAR À
CARACTERIZAÇÃO DE
ENCOSTA SUSCETÍVEL A
MOVIMENTOS DE MASSA:
ESTUDO DE CASO NA
COMUNIDADE PORTO DA
VOVÓ, SÃO LUÍS/MA,
BRASIL**

**SOIL PENETRATION RESISTANCE AS COMPLEMENTARY INFORMATION
FOR THE CHARACTERIZATION OF A SLOPE SUSCEPTIBLE TO MASS
MOVEMENTS: A CASE STUDY IN THE PORTO DA VOVÓ COMMUNITY, SÃO
LUÍS, MARANHÃO, BRAZIL**

Laécio Gil Coelho Santos¹

Débora Gentil Rodriguez Cal²

Fernanda Miranda Gouveia³

Levy Di Cássio Pereira Cunha⁴

Carlos David Veiga França⁵

Aderian dos Santos Rodrigues⁶

Weslem Jhony de Oliveira Rodrigues⁷

Cleyton Cruz do Espírito Santo⁸

Felipe Gabriel Ferreira da Silva⁹

Victor Matos Martins¹⁰

Angélica Christina Pinto Ferreira Veiga¹¹

Marcelo Rassy Teixeira¹²

RESUMO

O presente estudo foi realizado em uma área com 1.998 m² de encosta localizada entre a Comunidade Porto da Vovó e o Comando Geral do Corpo de Bombeiros do Maranhão, cidade de São Luís. Registros oficiais de 2019, 2020 e 2024 apresentaram processos erosivos, disposição de águas servidas e princípios de movimentos de massa na encosta. Esse trabalho busca avaliar a contribuição do uso do penetrômetro digital PenetroLOG (Falker, Ltda) na avaliação do solo da área com intuito de auxiliar na identificação de áreas suscetíveis a movimentos de massa. Para isso, foram obtidos 30 perfis de resistência à penetração, investigados até 20 cm de profundidade. A análise inicial revelou elevada variabilidade dos resultados, com média geral de 518,93 kPa, mediana de 497,00 kPa e coeficiente de variação de 79,19%. Foi identificado comportamento diferenciado com a profundidade, com aumento progressivo da RP média nas camadas subsuperficiais e maior valor médio aos 15 cm. Os maiores valores de resistência foram obtidos entre a média e a base da encosta em áreas com elevada quantidade de pequenas rochas e resíduos urbanos. Concluiu-se que as profundidades dos 30 pontos possuem variabilidade em função das condições superficiais do solo: quantidade de resíduos urbanos, matéria orgânica e pequenas rochas na subsuperfície. O uso do penetrômetro contribui para a caracterização da heterogeneidade física superficial da encosta, fornecendo informação quantitativa complementar à interpretação das condições associadas aos movimentos de massa o que deve ser considerado no planejamento de ações de contenção de encostas.

Palavras-chave: Encostas; penetrômetro digital; resistência à penetração; variabilidade.

ABSTRACT

The present study was conducted on a 1,998 m² slope area located between the Porto da Vovó Community and the General Command of the Maranhão State Fire Department, in the city of São Luís, Brazil. Official records from 2019, 2020, and 2024 documented erosional processes, wastewater discharge, and incipient mass-movement processes on the slope. This study aimed to evaluate the contribution of the digital PenetroLOG penetrometer (Falker Ltd.) to soil assessment in the study area, with the purpose of providing complementary information for the identification of areas susceptible to mass movements. To this end, 30 penetration resistance profiles were obtained to a depth of 20 cm. The initial analysis revealed high variability in the results, with an overall mean of 518.93 kPa, a median of 497.00 kPa, and a coefficient of variation of 79.19%. A distinct depth-dependent pattern was identified, characterized by a progressive increase in mean penetration resistance (PR) in the subsurface layers, with the highest mean value recorded at 15 cm depth. The highest resistance values were observed in the middle and lower portions of the slope, particularly in areas with a high concentration of small rocks and urban waste. It was concluded that penetration resistance at the 30 sampling points varied according to the soil's surface and near-surface conditions, particularly the presence and amount of urban waste, organic matter, and small rocks in the subsurface. The use of a penetrometer contributes to the characterization of the superficial physical heterogeneity of the slope by providing quantitative complementary information for interpreting the conditions associated with mass movements. This information should be considered in the planning of slope stabilization and containment measures.

Keywords: Slopes; digital penetrometer; penetration resistance; variability.

1. INTRODUÇÃO

Os movimentos de massa constituem processos naturais associados à dinâmica das encostas, caracterizados pelo deslocamento de materiais sob ação predominante da gravidade. Sua ocorrência está relacionada à interação entre características do relevo, condições hidrológicas, cobertura vegetal e fatores climáticos (Varnes, 1984; Cruden; Varnes, 1996; Highland; Bobrowsky, 2008).

Em áreas urbanizadas, intervenções antrópicas, como cortes e aterros, retirada da vegetação, lançamento inadequado de águas pluviais e servidas, deficiência dos sistemas de drenagem e ocupação de terrenos com elevada declividade podem modificar as condições naturais das vertentes e favorecer processos de instabilidade (Augusto Filho, 1992; Fernandes; Amaral, 2000; Quevedo *et al.*, 2023).

Diversos estudos consideram a interação desses fatores como ferramenta de avaliação do comportamento dos movimentos de massa em encostas. Além de informações obtidas por levantamento cartográfico e inspeções de campo, dados quantitativos relacionados às propriedades físicas do solo podem contribuir para ampliar a caracterização das condições locais (Greco et al., 2023).

Entre essas informações encontra-se a resistência do solo à penetração (RP), determinada *in situ* a partir da resistência oferecida pelo solo à introdução de um cone padronizado.

No presente estudo, a RP foi determinada por meio do PenetroLOG PLG2040, medidor digital de compactação do solo que registra a resistência à penetração em quilopascal (kPa) em função da profundidade. Para esse estudo, o penetrômetro da Falker foi aplicado em uma área de encosta localizada na cidade de São Luís, capital do Estado do Maranhão.

A área de estudo corresponde à Comunidade Porto da Vovó, situada na Vila Bacanga, nas proximidades da Avenida dos Portugueses, em São Luís/MA. A comunidade está localizada a jusante de uma encosta adjacente ao Quartel do Comando Geral do Corpo de Bombeiros Militar do Maranhão (QCG/CBMMA), para a qual existem registros técnicos anteriores de processos erosivos e manifestações de movimentos de massa.

O Parecer Técnico nº 01/2020 registrou evolução de processos erosivos, crescimento de cicatriz de rastejo, movimentos de massa associados a pontos de deposição de águas pluviais, perda da cobertura vegetal e setores de elevada declividade (Cepdecma, 2020). Em nova avaliação, o Parecer Técnico nº 32/2024 caracterizou o local como uma encosta natural com cota aproximada de 10 m na base e 30 m na crista.

Embora esses levantamentos forneçam informações importantes para a compreensão da área, as avaliações anteriores foram predominantemente baseadas em inspeções visuais de condições superficiais. O próprio Parecer Técnico nº 32/2024 informa que a metodologia adotada correspondeu à Inspeção Visual Nível I, sem realização de medições, testes ou ensaios (Cepdecma, 2024).

Diante desse contexto, pretende-se descobrir com esse estudo qual a relação entre a resistência do solo à penetração e as condições associadas à ocorrência de movimentos de massa identificadas na encosta da Comunidade Porto da Vovó, em São Luís/MA.

Parte-se da hipótese de que a resistência à penetração apresenta variações espaciais e verticais que podem estar relacionadas às diferentes condições físicas e ambientais observadas na encosta. Entretanto, não se pressupõe a existência de um valor de RP capaz de determinar, isoladamente, a estabilidade ou instabilidade do solo, uma vez que a resistência à penetração é influenciada por diferentes propriedades e condições do material (Huber; Souza, 2014).

A pesquisa justifica-se pela existência de uma comunidade situada a jusante de uma encosta com histórico documentado de processos erosivos e movimentos de massa (CBMMA, 2019; Cepdecma, 2024), bem como pela possibilidade de complementar as avaliações existentes com dados quantitativos obtidos diretamente no terreno.

Assim, o objetivo geral deste trabalho foi analisar a resistência do solo à penetração na encosta da Comunidade Porto da Vovó e sua relação com as condições e evidências associadas à ocorrência de movimentos de massa na área estudada. Para isso, buscou-se: caracterizar os principais condicionantes e evidências de movimentos de massa registrados na área; analisar estatisticamente a resistência do solo à penetração e sua variação com a profundidade; avaliar a distribuição espacial dos valores de RP nos pontos investigados e confrontar os resultados de resistência à penetração com as condições e evidências de instabilidade identificadas na encosta.

Ressalta-se que este estudo não pretendeu propor valores-limite, faixas de compactação ou parâmetros de resistência à penetração para classificar o solo como estável ou instável. A RP foi empregada como informação física complementar, contribuindo para a compreensão das variações do terreno e de sua possível relação com as condições associadas aos movimentos de massa.

2. MOVIMENTOS DE MASSA E CONDICIONANTES DE INSTABILIDADE EM ENCOSTAS URBANAS

Os movimentos de massa correspondem ao deslocamento de materiais constituintes das encostas sob ação predominante da gravidade, podendo envolver solo, rocha, detritos ou combinações desses materiais e apresentar diferentes mecanismos e velocidades de movimentação (Varnes, 1984; Cruden; Varnes, 1996). A classificação desses processos considera aspectos relacionados ao tipo de material mobilizado e ao mecanismo do movimento, abrangendo fenômenos como quedas, tombamentos, escorregamentos, espalhamentos e fluxos (Cruden; Varnes, 1996; Highland; Bobrowsky, 2008).

A ocorrência desses fenômenos depende da interação entre diferentes condicionantes naturais. Entre eles destacam-se a geometria e a declividade das vertentes, características geológicas e pedológicas, propriedades físicas e mecânicas dos materiais, cobertura vegetal e condições hidrológicas (Varnes, 1984; Aleotti e Chowdhury, 1999; Fernandes; Amaral, 2000; Quevedo *et al.*, 2023; Li; Duan, 2024). Dessa maneira, a análise da instabilidade de uma encosta não deve considerar isoladamente apenas um atributo do terreno, mas a interação entre os diferentes fatores envolvidos.

A declividade constitui um dos principais condicionantes geomorfológicos dos movimentos de massa, pois influencia diretamente as componentes das forças atuantes sobre os materiais da vertente. Entretanto, a ocorrência de instabilidade não é determinada exclusivamente pela inclinação do terreno, uma vez que vertentes com declividades semelhantes podem apresentar comportamentos distintos em razão das características dos materiais, da presença de água, da cobertura superficial e das intervenções antrópicas (Fernandes; Amaral, 2000; Fell *et al.*, 2008).

A água também desempenha papel relevante na dinâmica das encostas. Nessa perspectiva, eventos pluviométricos podem atuar como gatilhos físicos, enquanto a magnitude dos danos depende também das vulnerabilidades preexistentes, como ocupação inadequada do solo, deficiência de drenagem e limitações do planejamento territorial (Batista *et al.*, 2026). A infiltração e a saturação podem alterar o estado físico e as condições de resistência dos materiais, enquanto a concentração do escoamento superficial favorece processos erosivos e modificações na geometria da vertente. Por essa razão, precipitação, drenagem, infiltração e condições de umidade estão frequentemente associadas à análise de movimentos de massa (Aleotti e Chowdhury, 1999; Highland; Bobrowsky, 2008; Greco *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023).

Em estudos recentes realizados na região amazônica, eventos associados à elevada pluviosidade apresentaram distribuição espacial relacionada às condições de vulnerabilidade socioambiental, reforçando a importância do planejamento territorial, da drenagem e do monitoramento ambiental para a redução dos impactos decorrentes desses fenômenos (Pinto *et al.*, 2025).

Nos ambientes urbanos, esses condicionantes naturais interagem com intervenções humanas capazes de alterar significativamente a dinâmica das vertentes. Cortes realizados sem critérios técnicos, aterros, retirada da cobertura vegetal, impermeabilização, lançamento de águas servidas, descarte inadequado de resíduos e ocupação de áreas íngremes podem contribuir para a intensificação dos processos erosivos e para a alteração das condições de estabilidade (Fernandes; Amaral, 2000; Guerra e Cunha, 1998; Quevedo *et al.*, 2023).

Estudos realizados na Amazônia também indicam que a ocupação irregular do território, a precariedade da infraestrutura urbana e as deficiências de planejamento podem potencializar os efeitos dos eventos pluviométricos, reforçando a importância da gestão territorial e do monitoramento na prevenção de desastres (Batista *et al.*, 2026).

A análise de desastres em ambientes urbanizados demonstra que seus impactos não decorrem exclusivamente dos condicionantes naturais, mas da interação entre fatores climáticos, geográficos e sociais e das intervenções humanas existentes no território (Silva *et al.*, 2025a).

Essa associação é especialmente importante em áreas densamente ocupadas, pois a ocorrência de movimentos de massa passa a envolver não apenas o processo físico, mas também suas consequências sobre edificações, infraestrutura e população. Nesse contexto, o conhecimento das características da encosta e dos fatores relacionados às manifestações de instabilidade constitui elemento importante para ações de prevenção e gestão de desastres (Highland; Bobrowsky, 2008; Fell *et al.*, 2008).

No contexto maranhense, a gestão de riscos de desastres deve considerar conjuntamente a suscetibilidade do território e a vulnerabilidade das populações expostas, priorizando ações de prevenção, mitigação e preparação em complemento às medidas de resposta e recuperação (Rocha et al., 2023).

Na Comunidade Porto da Vovó, os levantamentos técnicos realizados ao longo dos últimos anos demonstram a coexistência de diferentes condicionantes. O Relatório Técnico de Engenharia nº 15/2019 registrou processos erosivos e condições relacionadas ao risco de deslizamento na encosta situada entre o QCG/CBMMA e a comunidade (CBMMA, 2019). Posteriormente, foram registrados crescimento de cicatrizes de rastejo, perda de cobertura vegetal, concentração de águas pluviais e movimentos de massa, além de setores com elevada declividade (Cepdecma, 2020).

Em 2024, nova inspeção identificou condições geológico-geotécnicas predisponentes à ocorrência de movimentos gravitacionais de massa. O levantamento registrou inclinação máxima de aproximadamente $70,5^\circ$, condições favoráveis a enxurradas, lançamento superficial de águas servidas, cicatrizes erosivas, árvores inclinadas e solo altamente saturado (Cepdecma, 2024). Esses registros demonstram que a área apresenta um conjunto de características que justificam sua investigação a partir de informações adicionais obtidas diretamente no terreno.

2.1. Propriedades Físicas do Solo e Sua Influência no Comportamento das Encostas

O solo constitui um material heterogêneo cujas características variam tanto horizontalmente quanto ao longo do perfil. Sua

resposta às solicitações externas e à circulação de água depende de propriedades como textura, estrutura, porosidade, densidade, teor de água e organização dos horizontes, entre outros atributos (Santos *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2021). Essas propriedades também influenciam os resultados obtidos em investigações realizadas diretamente no terreno.

Do ponto de vista da estabilidade de encostas, as propriedades do solo assumem importância porque interferem na infiltração, no armazenamento e na circulação de água e no comportamento mecânico dos materiais. Por essa razão, investigações geológico-geotécnicas podem empregar diferentes procedimentos para caracterizar o terreno, incluindo ensaios de campo, caracterização granulométrica, limites de consistência e ensaios destinados à determinação de parâmetros de resistência (Guidicini; Nieble, 1984; Augusto Filho, 1992).

A presença de água merece especial atenção porque pode modificar significativamente o comportamento do solo. A elevação do teor de água e a saturação alteram as condições do material e podem contribuir para mudanças na resistência e na resposta mecânica da encosta. Entretanto, essas relações dependem das características específicas do solo e das condições locais, não sendo adequado interpretar um único atributo físico como responsável isolado pela ocorrência de instabilidade (Fernandes; Amaral, 2000; Highland; Bobrowsky, 2008).

Essa consideração é particularmente relevante para a presente pesquisa porque a resistência à penetração não corresponde diretamente à resistência ao cisalhamento do solo. Embora ambas estejam relacionadas ao comportamento do material, possuem

significados e procedimentos de determinação distintos. A avaliação quantitativa da estabilidade de um talude exige parâmetros e modelos próprios, como aqueles utilizados em análises de equilíbrio limite, que consideram resistência ao cisalhamento, geometria, condições de água e outras características geotécnicas (Bishop, 1955; Morgenstern; Price, 1965).

2.2. Resistência do Solo à Penetração com Uso de Penetrômetro Digital

A resistência do solo à penetração (RP) corresponde à resistência oferecida pelo material à introdução de uma haste ou cone e constitui uma técnica de investigação *in situ* capaz de fornecer informações sobre o estado físico do solo ao longo da profundidade. A utilização de penetrômetros permite produzir perfis verticais de resistência e, quando diferentes pontos são investigados, analisar também a variabilidade espacial dessa propriedade (Asabe, 1999; Asabe, 2019; Salman; Kiss, 2021; Wang *et al.*, 2021).

A padronização das características do penetrômetro é relevante porque a geometria do cone, a velocidade de penetração e o procedimento de aquisição interferem na comparabilidade dos resultados. A norma ASAE S313.3 estabelece especificações relacionadas ao penetrômetro de cone, enquanto a ASABE EP542.1 apresenta procedimentos para utilização e apresentação dos dados obtidos com esse equipamento (Asabe, 1999; Asabe, 2019).

Os valores da RP são influenciados por diferentes características do solo, principalmente textura, densidade, estrutura e teor de água. Consequentemente, uma alteração na resistência estimativa registrada pelo penetrômetro não significa necessariamente

alteração equivalente na resistência mecânica relacionada à estabilidade de uma encosta (Bengough *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2021; Lardy *et al.*, 2022).

2.3. Relação Entre Resistência à Penetração, Infiltração, Escoamento e Processos de Vertente

A utilização da resistência à penetração em estudos geomorfológicos decorre da possibilidade de investigar diferenças físicas existentes no solo e relacioná-las a outros processos que atuam nas vertentes. Entretanto, essa relação não deve ser entendida de forma determinística, pois valores semelhantes de RP podem ocorrer em materiais ou condições ambientais diferentes.

Oliveira e Souza (2013) analisaram a fragilidade de vertentes urbanas a partir da relação entre resistência à penetração e taxa de infiltração em diferentes Argissolos. Os autores utilizaram penetrômetro de impacto associado a informações topográficas e posicionamento por GPS, demonstrando a possibilidade de integrar medições de campo à análise espacial das condições das vertentes.

A relação entre resistência à penetração e comportamento hídrico é particularmente relevante porque alterações nas propriedades físicas do solo podem interferir na infiltração e no escoamento superficial. Em determinadas condições, maior densidade e menor porosidade podem reduzir a infiltração e favorecer maior concentração de água na superfície. Entretanto, essa relação depende das características do material, da cobertura e do teor de água, não sendo possível atribuir o comportamento hidrológico exclusivamente aos valores de RP (Oliveira; Souza, 2013; Huber; Souza, 2014).

Huber e Souza (2014) investigaram de maneira mais específica a fragilidade do sistema relevo-solo utilizando resistência à penetração em Argissolos e Neossolos. O estudo avaliou a relação da RP com características físicas do solo e com sua suscetibilidade à erosão. Os autores observaram que valores mais elevados poderiam estar relacionados a condições de maior compactação, menor infiltração e maior escoamento superficial, mas os resultados também demonstraram a complexidade dessa associação.

Sob determinadas condições de relevo, umidade e cobertura vegetal, diferentes classes de solo apresentaram curvas semelhantes de RP (Huber; Souza, 2014). Os autores concluíram que a resistência à penetração forneceu informações importantes sobre características relacionadas ao uso, cobertura, umidade e compactação, mas não apresentou, isoladamente, segurança suficiente para diferenciar a suscetibilidade dos solos analisados.

Embora erosão e movimentos de massa sejam processos distintos, ambos estão relacionados à dinâmica das vertentes. Assim, os resultados de estudos envolvendo RP e erosão são úteis para compreender as possibilidades e, principalmente, as limitações da utilização dessa variável em investigações de encostas. Não se deve, contudo, transferir diretamente uma relação identificada para erosão como se fosse um parâmetro de ocorrência de escorregamentos.

No caso da Comunidade Porto da Vovó, essa precaução torna-se ainda mais importante diante da presença documentada de problemas de drenagem, concentração de águas superficiais, processos erosivos, elevada declividade e condições de saturação (CBMMA, 2019; Cepdecma, 2020; Cepdecma, 2024). A RP deve,

portanto, ser interpretada em conjunto com esse contexto, buscando-se identificar possíveis correspondências entre a variação da resistência e as condições observadas, sem estabelecer uma relação causal a partir do penetrômetro isoladamente.

2.4. Aplicação de Ensaio de Penetração em Áreas com Movimentos de Massa

A caracterização geotécnica de áreas sujeitas a movimentos de massa pode envolver diferentes métodos de investigação, selecionados de acordo com os objetivos, a escala do trabalho e as características do terreno. Sondagens, ensaios de campo, métodos geofísicos e análises laboratoriais podem fornecer informações complementares para a compreensão da estrutura e do comportamento dos materiais presentes nas encostas (Augusto Filho, 1992; Guidicini; Nieble, 1984).

Nesse contexto, ensaios de penetração apresentam a vantagem de possibilitar a obtenção de informações diretamente no terreno e em diferentes profundidades. Entretanto, diferentes equipamentos apresentam princípios de funcionamento, energias, dimensões de cone e procedimentos de aquisição distintos. Por esse motivo, resultados produzidos por diferentes tipos de penetrômetros não devem ser comparados numericamente sem considerar as diferenças metodológicas.

Bortolozo *et al.* (2023) demonstraram a possibilidade de integrar informações obtidas por ensaios de penetração com métodos geofísicos em estudos relacionados a movimentos de massa. Os autores combinaram resistividade elétrica, sondagem SPT e penetrômetro dinâmico leve (DPL), produzindo representações das

condições subsuperficiais do terreno. A abordagem demonstra que dados de penetração podem contribuir para a compreensão da heterogeneidade do subsolo quando interpretados conjuntamente com outras informações.

Essa perspectiva de integração metodológica também é destacada por Silva et al. (2025b), segundo os quais a combinação entre geotecnologias e métodos de investigação geotécnica e geofísica amplia a capacidade de caracterização do terreno e fortalece a fundamentação técnica das análises ambientais.

Trabalhos internacionais utilizam informações de resistência para auxiliar na caracterização das condições subsuperficiais, identificação de diferenças entre horizontes e análise de materiais presentes em áreas de iniciação ou ocorrência de movimentos (Yoshihara; Umezawa, 2023). Dessa forma, a penetração constitui uma ferramenta complementar de investigação e não substitui a caracterização geotécnica necessária quando se pretende determinar quantitativamente a estabilidade de um talude.

Neste trabalho, essa distinção assume importância metodológica. Os 30 perfis obtidos com o PenetroLOG fornecem uma representação da variação da resistência nos primeiros 20 cm do terreno, mas não caracterizam integralmente o maciço da encosta, nem permitem determinar diretamente superfícies de ruptura profundas.

3. METODOLOGIA

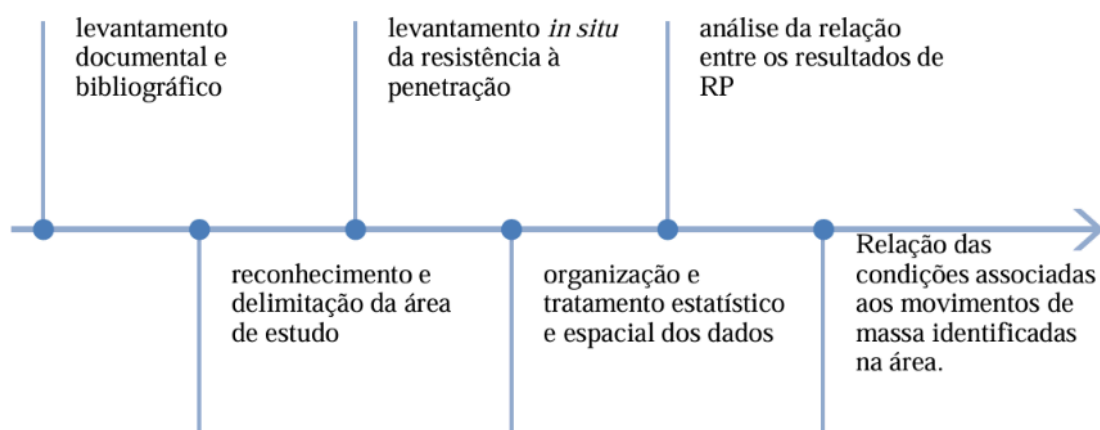
A pesquisa caracteriza-se como aplicada, de abordagem quantitativa, caráter descritivo e analítico e delineamento de estudo

de caso, tendo como área de investigação a encosta localizada junto à Comunidade Porto da Vovó, no município de São Luís.

O caráter aplicado decorre da utilização de dados obtidos diretamente em campo para ampliar o conhecimento sobre uma área que apresenta histórico documentado de processos erosivos e manifestações de movimentos de massa. O estudo possui abordagem quantitativa em razão da obtenção e do tratamento estatístico de valores de resistência do solo à penetração (RP), expressos em quilopascal (kPa), associados às respectivas profundidades e posições geográficas.

A pesquisa também apresenta caráter descritivo, uma vez que busca caracterizar a distribuição vertical e espacial da RP, e analítico, por confrontar os resultados obtidos com as características da encosta, os registros técnicos existentes e estudos científicos que utilizaram ensaios de penetração em investigações de solos e vertentes. O fluxograma a seguir apresenta a ordem de pesquisa e obtenção dos dados (Figura 1).

Figura 1. Fluxograma das etapas do estudo



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Vale ressaltar que, diferentemente de uma análise determinística de estabilidade, não serão estabelecidos valores críticos ou intervalos de RP destinados a classificar o solo como estável ou instável. A resistência à penetração será utilizada como informação física complementar, cuja interpretação foi realizada considerando as condições específicas da área e as limitações inerentes ao ensaio.

Os valores obtidos com penetrômetro não devem ser empregados, isoladamente, para determinar fator de segurança ou concluir que determinado setor está necessariamente estável ou instável. No contexto deste trabalho, sua finalidade é acrescentar uma informação física de campo à caracterização da encosta.

Da mesma maneira, não existe no escopo desta pesquisa a proposição de um valor crítico de RP que separe solos “estáveis” de solos “instáveis”. A ocorrência de movimentos de massa depende da interação entre diversos condicionantes e mecanismos, e a RP representa apenas uma das informações relacionadas às condições físicas do material investigado (Huber; Souza, 2014).

Além disso, o levantamento realizado não inclui determinação simultânea do teor de umidade em cada ponto, caracterização granulométrica completa ou ensaios de resistência ao cisalhamento. Consequentemente, eventuais diferenças de RP observadas entre os pontos não podem ser atribuídas exclusivamente à compactação ou utilizadas diretamente para determinar parâmetros geotécnicos não medidos.

3.1. Sobre a área de Estudo

A área investigada corresponde à encosta situada entre o QCG/CBMMA e a Comunidade Porto da Vovó, na região da Vila

Bacanga, em São Luís/MA (Figura 2). Na figura abaixo a encosta é apresentada no plano de superfície 3D obtida pelo Google Earth em polígono vermelho e a comunidade está apresentada em polígono branco.

Figura 2. Encosta localizada na comunidade Porto da Vovó



Fonte: Google Earth, 2026.

A área da encosta foi delimitada considerando o trecho que compreende o QCG-CBM e algumas casas da comunidade. Para isso foi construído um polígono como amostra, equivalendo a cerca de 1.998 m² de área. A comunidade ocupa setores localizados a jusante da encosta, cuja área apresenta histórico de processos erosivos e manifestações de movimentos de massa documentados em levantamentos técnicos anteriores.

Conforme o Parecer Técnico nº 32/2024 há uma nova caracterização da área, registrando cota aproximada de 10 m na base e 30 m na crista, distância horizontal aproximada de 20 m e inclinação máxima de 70,5°.

O mesmo parecer classificou a área como R3 – Risco Alto e registrou condicionantes geológico-geotécnicas predisponentes à ocorrência de movimentos gravitacionais de massa (Cepdecma, 2024). Ressalta-

se que essa classificação corresponde à avaliação realizada naquele documento e não foi produzida a partir dos valores de RP obtidos na presente pesquisa.

A escolha da área decorreu, portanto, da coexistência de três condições relevantes: histórico documentado de processos de instabilidade, presença de ocupação a jusante e disponibilidade de registros técnicos anteriores que permitem contextualizar os novos dados quantitativos obtidos em campo.

3.2. Levantamento Documental, Trabalho de Campo e Cartográfico

Essa etapa consistiu no levantamento de documentos técnicos produzidos anteriormente sobre a área de estudo. Foram utilizados como principais documentos o Relatório Técnico de Engenharia nº 15/2019, o Parecer Técnico nº 01/2020, o Parecer Técnico nº 22/2022 e o Parecer Técnico nº 32/2024, elaborados no âmbito do Corpo de Bombeiros Militar do Maranhão e da Coordenadoria Estadual de Proteção e Defesa Civil do Maranhão (CBMMA, 2019; Cepdecma, 2020, 2022 e 2024).

A utilização integrada de registros técnicos, inspeções de campo e informações espaciais apresenta aplicação consolidada nas ações de Proteção e Defesa Civil no Maranhão, contribuindo para a identificação de áreas vulneráveis e para a produção de informações destinadas à prevenção e à gestão de riscos (França et al., 2023).

Particularmente, o Parecer Técnico nº 32/2024 informa que sua avaliação foi realizada por meio de inspeção visual, sem medições, testes ou ensaios (Cepdecma, 2024). Dessa forma, os dados obtidos pelo PenetroLOG constituem uma informação quantitativa adicional

em relação às avaliações predominantemente visuais disponíveis para a área.

Posteriormente, realizou-se o reconhecimento de campo, com observação das características superficiais da encosta e definição dos locais destinados às medições de resistência à penetração. Durante essa etapa, foram consideradas as condições de acesso, distribuição espacial dos pontos e características observáveis do terreno.

Inicialmente os pontos seriam coletados a partir de malha retangular, onde a aplicação do penetrômetro seria disposta em distâncias equivalentes numa malha de 10x30 metros. No entanto, devido às más condições de acesso – pontos da encosta íngremes, quantidade de arbustos e entulho - a aplicação dessa forma não foi possível.

Foram registrados fotograficamente aspectos relevantes da área e a execução dos ensaios. Os registros de campo foram utilizados como documentação auxiliar para a interpretação posterior dos resultados. As figuras a seguir apresentam alguns pontos de coleta e o equipamento utilizado na encosta (Figura 3).

Figura 3. Aplicação do penetrômetroLOG no decorrer da encosta



Fonte: Registro dos autores, 2026.

Foram elaborados os mapas de localização para apresentar a situação da área com a Ilha em que ela se encontra. O mapa de pontos foi elaborado a partir da ferramenta Google Earth, com visualização 3D e plotagem dos pontos obtidos da exportação das medidas e das coordenadas no sistema do penetrômetro Falker.

A partir dos 30 pontos de coleta exportados também foi possível realizar as análises estatísticas no programa Microsoft Excel. Nesse ambiente, foram feitos os gráficos de barras e de linhas para apresentação da variabilidade da resistência à penetração no solo com o intuito de tornar os dados mais visuais.

Os dados das planilhas foram importados para o software Qgis (versão 3.40) juntamente com os pontos de coleta. Inicialmente a planilha foi mesclada com a camada vetorial dos pontos de coleta, gerando assim uma tabela de atributos constando o valor de média, desvio padrão, coeficiente de variância e os valores Kpa individual de cada ponto em cada camada de 1 até 20 cm.

Com isso, os pontos de coleta foram interpolados por meio do método IDW que transforma dados amostrais em uma estimativa espacial para áreas próximas de um ponto conhecido. A partir do

ponto conhecido (pontos de coleta) a área sem pontos foram estimadas conforme a proximidade. Isso foi relevante porque a malha regular inicialmente planejada não pôde ser executada devido à declividade, vegetação, entulho e limitações de acesso.

A partir da interpolação foi gerado os mapas de média da resistência à penetração que demonstra os pontos com maior e menor média Kpa, e o mapa de valor máximo que apresenta áreas com camadas de maior Kpa, ou seja, maior resistência à penetração.

3.3. Determinação *In Situ* da Resistência do Solo à Penetração

A resistência do solo à penetração foi determinada *in situ* utilizando o PenetroLOG PLG2040, fabricado pela Falker Ltda (2020). O equipamento é destinado à obtenção de perfis de resistência à penetração e registra os resultados em função da profundidade, expressando a RP em quilopascal (kPa).

O princípio de funcionamento consiste na introdução de um cone no solo, sendo registrada a resistência oferecida pelo material ao avanço do conjunto. As características geométricas do cone e os procedimentos de execução são relevantes para a interpretação dos resultados, razão pela qual foram consideradas as orientações do fabricante e as recomendações aplicáveis ao emprego de penetrômetros de cone.

O manual do PenetroLOG PLG2040 informa que as dimensões dos cones utilizados pelo equipamento seguem a ASAE S313.3, referência técnica para penetrômetros de cone. Também foram consideradas as recomendações da ASABE EP542.1, relacionadas aos procedimentos de utilização e apresentação de dados obtidos com penetrômetros de cone (Asabe, 1999; Asabe, 2019; Falker Ltda, 2020).

No levantamento realizado foram estabelecidos 30 pontos de medição, distribuídos na área investigada e associados às respectivas posições geográficas (Figura 4). Em cada ponto foi realizado um perfil de RP até a profundidade máxima de 20 cm, utilizando-se cone tipo 1 e resolução vertical de 1 cm. Dessa forma, cada perfil forneceu 20 registros de resistência, correspondentes às profundidades entre 1 e 20 cm.

Figura 4. Localização dos 30 pontos de medição do PenetroLOG



Fonte: Google Earth, 2026.

Ao final do levantamento, foram obtidos 30 perfis e 600 observações individuais de RP. Os registros foram posteriormente transferidos e organizados em banco de dados contendo, identificação do ponto, coordenadas geográficas, profundidade e resistência à penetração.

Embora o PenetroLOG seja denominado pelo fabricante como medidor digital de compactação do solo (Falker, 2020) o parâmetro efetivamente registrado e analisado no estudo é a resistência à penetração, expressa em kPa. Portanto, os resultados foram apresentados prioritariamente como valores de RP, evitando

transformar automaticamente cada leitura em uma classificação de grau de compactação.

3.4. Tratamento dos Dados de RP

Inicialmente, foi realizada uma conferência dos registros para identificação de valores ausentes, inconsistências, alertas operacionais e demais ocorrências indicadas nos relatórios do equipamento. Essa etapa constitui o controle de qualidade dos dados antes da realização das análises estatísticas.

Especial atenção foi dada aos registros de valor igual a 0 kPa observados principalmente nas menores profundidades. Esses valores foram preservados no banco original e analisados à luz do funcionamento do equipamento, evitando interpretá-los automaticamente como ausência absoluta de resistência do solo.

A análise estatística descritiva compreendeu, para o conjunto de dados, o cálculo de média aritmética, mediana, valores mínimo e máximo, desvio-padrão e coeficiente de variação (CV). O coeficiente de variação foi utilizado como medida relativa de dispersão, permitindo comparar a heterogeneidade dos valores entre profundidades que apresentam médias distintas.

A análise foi conduzida em níveis complementares. No primeiro, foram avaliadas as 600 observações conjuntamente, fornecendo uma caracterização geral da amplitude e variabilidade da RP. No segundo, foram calculadas estatísticas para cada uma das profundidades entre 1 e 20 cm, permitindo construir o perfil médio vertical da resistência e apresentado em gráficos.

A utilização conjunta da média e da mediana é particularmente relevante diante da elevada dispersão observada no conjunto de dados, pois permite verificar a influência de valores extremos sobre a tendência central. O desvio-padrão e o CV foram utilizados para complementar a análise da variabilidade.

3.5. Análise da Distribuição Vertical da Resistência à Penetração

A distribuição vertical foi analisada a partir dos valores registrados em intervalos de 1 cm, entre 1 e 20 cm de profundidade. Para cada profundidade foram calculadas as medidas estatísticas descritas anteriormente, possibilitando avaliar a evolução da RP ao longo do perfil investigado.

Essa etapa buscou identificar tendências de aumento, redução ou manutenção da resistência com a profundidade, bem como profundidades caracterizadas por maior ou menor variabilidade entre os pontos.

A identificação de uma faixa com valores mais elevados de RP foi descrita como aumento de resistência à penetração, evitando-se classificá-la automaticamente como “camada compactada”.

Valores reduzidos de RP não foram interpretados automaticamente como solo solto, fraco ou instável. Essa precaução metodológica é necessária porque o ensaio realizado não determina diretamente parâmetros de resistência ao cisalhamento, como coesão e ângulo de atrito, tampouco fornece diretamente o fator de segurança da encosta.

A análise vertical foi posteriormente confrontada com os resultados apresentados por Huber e Souza (2014), que também investigaram a

variação da resistência à penetração ao longo do perfil do solo. A comparação foi predominantemente qualitativa, considerando as diferenças de equipamento, profundidade de investigação, solos e demais procedimentos entre os estudos.

3.6. Identificação da Relação Entre Resistência à Penetração e Movimentos de Massa

A relação entre resistência à penetração e movimentos de massa foi investigada por meio do confronto entre três conjuntos de informações: (a) comportamento vertical e espacial da RP; (b) características e evidências observadas durante o levantamento de campo; e (c) registros históricos constantes nos documentos técnicos referentes à encosta.

Não foi adotado um valor de referência em kPa para separar setores estáveis e instáveis. Também não foi utilizada a RP para calcular diretamente probabilidade de ruptura, fator de segurança ou resistência ao cisalhamento. O objetivo foi identificar se os dados fornecem informação complementar capaz de contribuir para a interpretação das condições da encosta.

Essa abordagem encontra respaldo no cuidado apontado por Huber e Souza (2014), que não estabeleceram uma relação simples e universal entre RP e suscetibilidade à erosão. As correspondências entre os padrões de RP e determinadas características da encosta foram apresentadas como associações identificadas no estudo de caso.

3.7. Comparação com Outros Estudos

O principal estudo utilizado para comparação foi o de Huber e Souza (2014), que analisou a fragilidade do sistema relevo-solo por meio da resistência à penetração em Argissolos e Neossolos. A escolha desse trabalho decorre da proximidade temática com a presente investigação e, especialmente, da discussão realizada pelos autores sobre as possibilidades e limitações da RP como variável relacionada às condições das vertentes.

Essa comparação contemplou: comportamento da RP com a profundidade; heterogeneidade entre os pontos; ocorrência de menores ou maiores resistências em determinadas faixas do perfil; e limitações encontradas para relacionar diretamente RP e processos de superfície.

Não foi realizada equivalência direta entre os valores absolutos obtidos nos dois trabalhos. Huber e Souza empregaram penetrômetro de impacto e investigaram perfis até aproximadamente 70 cm, enquanto o presente estudo utiliza penetrômetro digital de cone e profundidade máxima de 20 cm.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização Geral da Resistência do Solo à Penetração

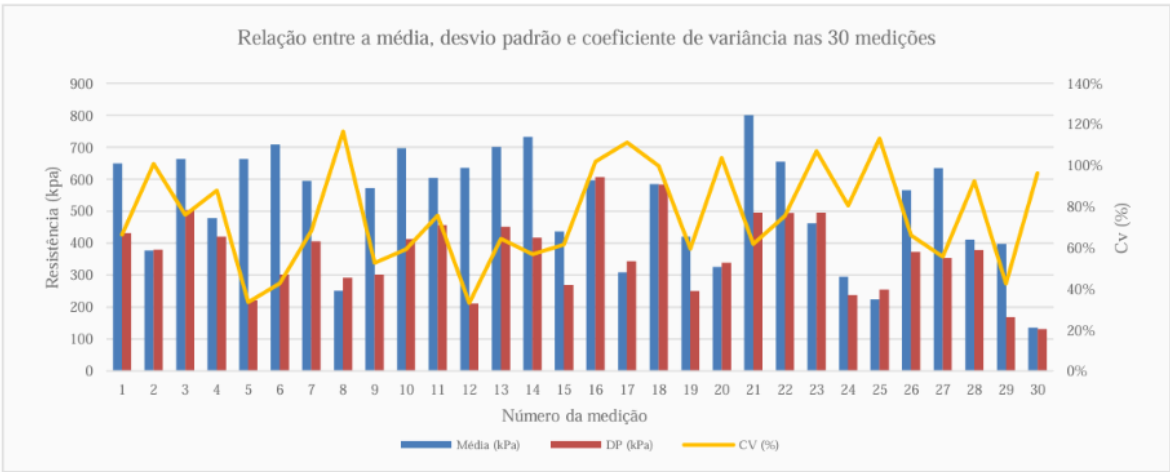
Considerando conjuntamente as 600 observações, obteve-se RP média de 518,93 kPa, mediana de 497,00 kPa, valor mínimo de 0 kPa, valor máximo de 1.863 kPa, desvio-padrão amostral de 410,96 kPa e coeficiente de variação (CV) de 79,19% (Tabela 1). O maior valor registrado, de 1.863 kPa, ocorreu no ponto 16, numa profundidade de 14 cm (Figura 5).

Tabela 1. Estatística descritiva geral dos valores de resistência à penetração

Parâmetro	Resultado
Número de perfis	30
Número de observações	600
Profundidade investigada	1-20 cm
Média	518,93 kPa
Mediana	497,00 kPa
Mínimo	0 kPa
Máximo	1.863 kPa
Desvio-padrão	410,96 kPa
Coeficiente de variação	79,19%

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Figura 5. Relação de média, desvio padrão e coeficiente de variância



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Essa heterogeneidade constitui um resultado relevante, pois demonstra que a condição superficial do terreno investigado não

pode ser adequadamente representada por um único valor de RP. A resistência varia tanto entre os pontos quanto ao longo da profundidade, o que justifica analisar separadamente essas duas dimensões.

Vale lembrar que a resistência à penetração é influenciada por fatores como teor de água, densidade, textura e estrutura do solo, entre outros atributos (Busscher, 1990; Bengough *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2021; Lardy *et al.*, 2022). Assim, diferenças entre os valores registrados podem representar mudanças nas condições físicas do material investigado, mas não permitem estabelecer isoladamente a condição de estabilidade do terreno.

Os valores iguais a 0 kPa foram preservados na análise, e sua interpretação considerou as condições de contato inicial entre o cone e o terreno. Esse resultado pode estar relacionado às características da camada mais superficial do terreno, composta por serrapilheira, matéria orgânica, resíduos sólidos, entulho e plásticos. Com isso, o cone não registrou pressão na penetração do cone.

Os resultados gerais demonstram, portanto, que a principal informação inicial fornecida pelo PenetroLOG não é a existência de um determinado “valor crítico”, mas que apesar da cobertura superficial ser composta por vegetação, a cobertura do solo é completamente variável o que justifica a variabilidade da resistência do terreno.

4.2. Variação da Resistência à Penetração com a Profundidade

A análise por profundidade revelou um padrão mais evidente que aquele observado apenas pelas estatísticas. Os menores valores médios ocorreram nas camadas superficiais, enquanto houve

aumento progressivo da resistência nas profundidades subsequentes.

Aos 1 cm de profundidade, a RP média foi de apenas 61,30 kPa. Aos 5 cm, a média aumentou para 206,13 kPa. A elevação tornou-se mais expressiva nas profundidades seguintes, alcançando 543,67 kPa aos 10 cm e 854,40 kPa aos 15 cm, maior média entre as profundidades analisadas. Aos 20 cm, a média permaneceu relativamente elevada, atingindo 773,70 kPa (Tabela 2 e figura 6).

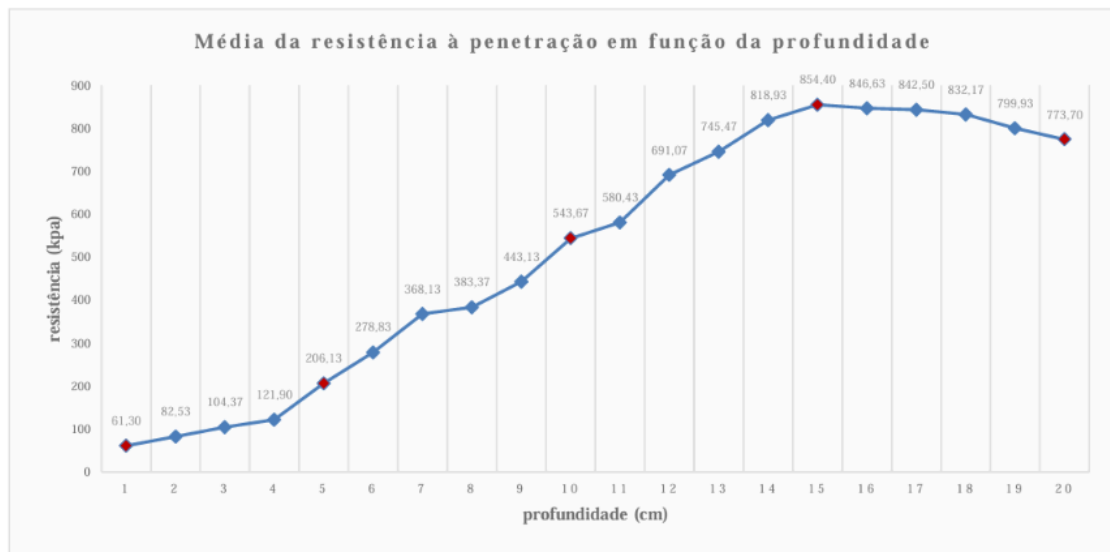
Tabela 2. Valores médios selecionados de RP em função da profundidade

Profundidade	RP média
1 cm	61,30 kPa
5 cm	206,13 kPa
10 cm	543,67 kPa
15 cm	854,40 kPa
20 cm	773,70 kPa

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A partir da figura 6 observa-se que há um salto de quase 100 kpa nas profundidades superiores a 9 cm. De maneira geral, podem ser reconhecidos três comportamentos: valores relativamente baixos nas camadas mais superficiais; crescimento mais acentuado nas profundidades intermediárias; e manutenção de valores elevados, com redução a partir dos 15 cm.

Figura 6. Média da resistência média à penetração (kPa) em função da profundidade



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

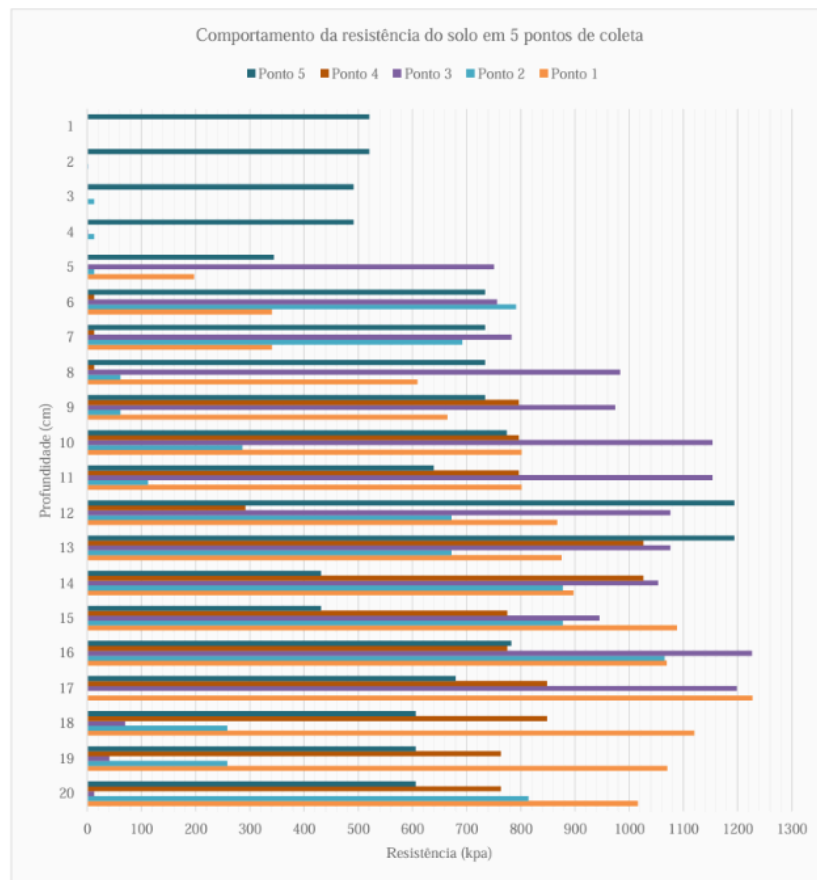
Considerando as cinco primeiras profundidades, entre 1 e 5 cm, predominam valores menores de RP, sendo que a mediana foi igual a zero nas profundidades de 1 a 4 cm. Entre aproximadamente 6 e 10 cm ocorre aumento progressivo da resistência. A faixa entre 11 e 15 cm concentra os maiores valores médios, culminando no máximo médio observado aos 15 cm. Entre 16 e 20 cm, a resistência permanece elevada em relação à superfície, embora apresente redução gradual (Figura 7).

Esse comportamento demonstra que os primeiros 20 cm do terreno não constituem um meio homogêneo em termos de resistência à penetração. Ao contrário, existe uma diferenciação vertical clara, com aumento da resistência nas camadas subsuperficiais.

O resultado não deve, entretanto, ser apresentado automaticamente como identificação de uma “camada compactada”. Embora valores maiores de RP possam estar associados a maior densidade ou compactação em determinadas condições, a resistência medida

pelo cone também depende do teor de água, textura, estrutura e outras características do solo (Busscher, 1990; Bengough *et al.*, 2001).

Figura 7. Resistência a penetração do solo nos 5 primeiros pontos de coleta



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Além da variação vertical, foram identificadas diferenças importantes entre os perfis obtidos nos diferentes locais da encosta. Considerando a média de RP de cada um dos 30 perfis, obteve-se média geral de 518,93 kPa, mediana de 577,50 kPa, menor média individual de 135 kPa e maior média individual de 800 kPa.

O desvio-padrão das médias dos perfis foi de aproximadamente 172,48 kPa, resultando em coeficiente de variação de 33,27%. Esses resultados demonstram que, mesmo quando a variação ao longo da profundidade é sintetizada pela média de cada perfil, permanecem diferenças entre os pontos investigados (Tabela 3).

Tabela 3. Estatística descritiva das médias dos 30 perfis

Parâmetro	Resultado
Número de perfis	30
Média das médias	518,93 kPa
Mediana	577,50 kPa
Menor média de perfil	135,00 kPa
Maior média de perfil	800,00 kPa
Desvio-padrão	172,48 kPa
CV	33,27%

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A diferença entre a menor e a maior média de perfil demonstra que determinados locais apresentaram resistência significativamente diferente de outros. Entretanto, assim como observado na análise vertical, essa diferença não permite classificar o ponto de maior RP como mais estável nem aquele de menor RP como mais instável.

A interpretação deve concentrar-se no fato de que o terreno apresenta heterogeneidade espacial mensurável em função da cobertura da superfície do solo e da vegetação. Essa informação é relevante porque as avaliações técnicas anteriores registraram diferentes condições ao longo da encosta, incluindo processos erosivos, alterações de drenagem, perda de cobertura vegetal, lançamento de águas e manifestações de movimentos de massa (CBMMA, 2019; Cepdecma, 2020; Cepdecma, 2024).

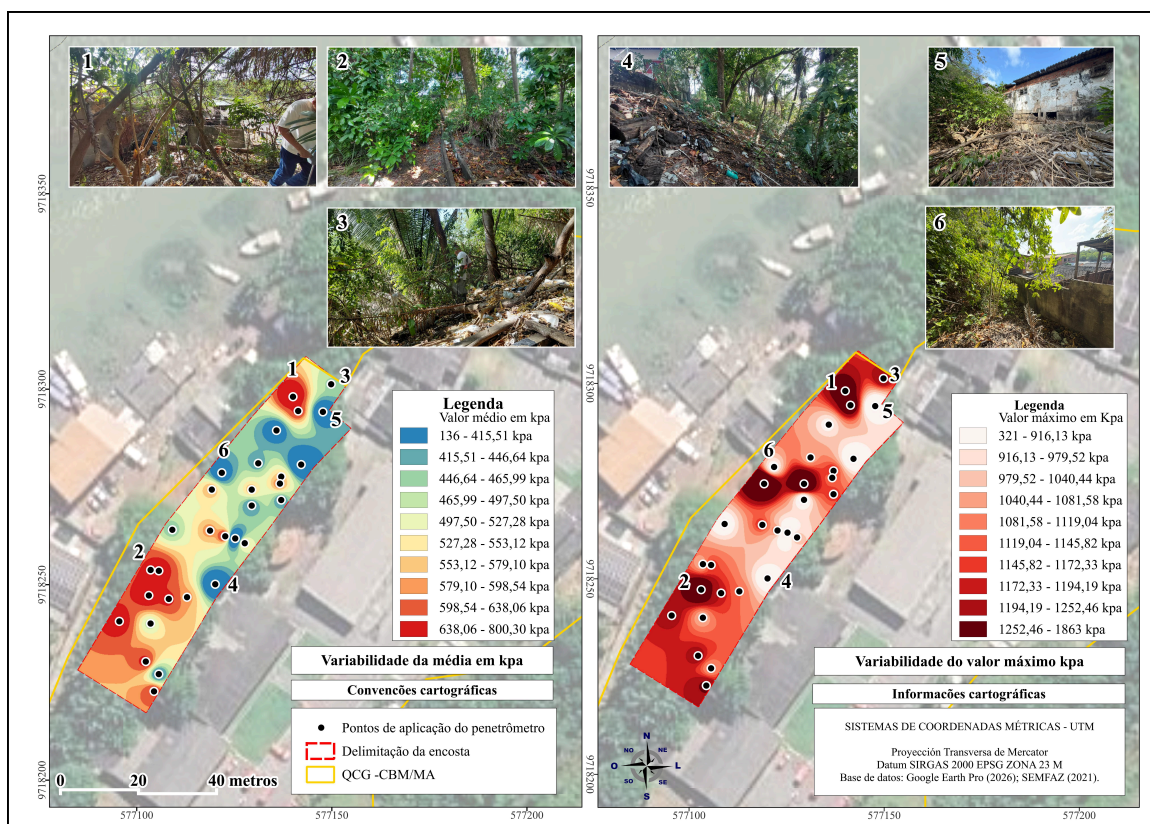
O mapa abaixo demonstra essa heterogeneidade, no qual as áreas de maior média de resistência à penetração são identificadas com cor mais intensa, ao passo que áreas com menor média estão em cores mais frias.

Na observação indicada com o número 1 a resistência média ficou entre 638 e 800 kpa, nesse local podem ser observados cobertura superficial com detritos de vegetação e acúmulo de resíduos sólidos urbanos. O mesmo se repete na observação de número 2, onde maior parte da área, incluindo vários pontos próximos, possuem valor médio de resistência alta tanto na base quanto na porção média da encosta. Nesses setores, durante o levantamento de campo, foi observada maior presença de pequenas rochas na subsuperfície, condição que dificultou a penetração do equipamento.

A mesma análise se reproduz no mapa de valor máximo de kPa onde as áreas das observações 1, 2 e 6 apresentaram maiores valores de resistência. Por outro lado, as áreas das observações 3, 4 e 5 resultaram em média de kPa baixo, o que se supõe menor valor máximo de kpa entre os 20 cm de profundidade do solo. Nessas áreas predominam resíduos sólidos, detritos e galhos de vegetação, porém a camada subsuperficial apresentou pouca camada de rochas pequenas.

A partir das duas representações mapeadas pode-se inferir que as áreas com menor resistência à penetração são encontradas do topo para o meio da encosta, enquanto as áreas com maior resistência estão na transição da média para a base da encosta (figura 8).

Figura 8. Interpolação dos valores médios e máximos dos 30 pontos de coleta



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

4.3. Distribuição Espacial da Resistência à Penetração e as Condições Associadas aos Movimentos de Massa

O posicionamento dos 30 pontos possibilita verificar se os diferentes comportamentos identificados estatisticamente apresentam organização espacial ao longo da encosta. A análise espacial com as características conhecidas do terreno demonstra a posição dos pontos com a topografia da encosta, cobertura do terreno, intervenções antrópicas e evidências de processos erosivos ou movimentos de massa documentadas durante as inspeções.

As avaliações técnicas anteriores forneceram descrições das condições da encosta, enquanto o levantamento atual acrescenta valores quantitativos georreferenciados de resistência à penetração. Os levantamentos técnicos realizados anteriormente na

Comunidade Porto da Vovó registraram diferentes elementos relacionados à dinâmica da encosta.

Em 2019 foram descritos processos erosivos e condições de risco associadas ao maciço. Em 2020 foram registradas cicatriz de rastejo, perda de cobertura vegetal, concentração de águas pluviais e manifestações de movimentos de massa. Em 2024 identificou elevada inclinação, lançamento superficial de águas servidas, deficiência de drenagem, árvores inclinadas, cicatrizes erosivas e condições de elevada saturação do solo (CBMMA, 2019; Cepdecma, 2020; Cepdecma, 2024).

Essas informações demonstram que os movimentos observados na área estão inseridos em um contexto no qual geometria da encosta, erosão e intervenções humanas coexistem.

As imagens no mapa a seguir apresentam características relacionadas a movimentos de massa, disposição de resíduos sólidos e de construção civil identificados na área conforme o parecer nº 32/2024 (Cepdecma, 2024) (Figura 9). Já figura 10 apresenta registros fotográficos atuais de pontos de coleta na área com destaque para a inclinação da encosta.

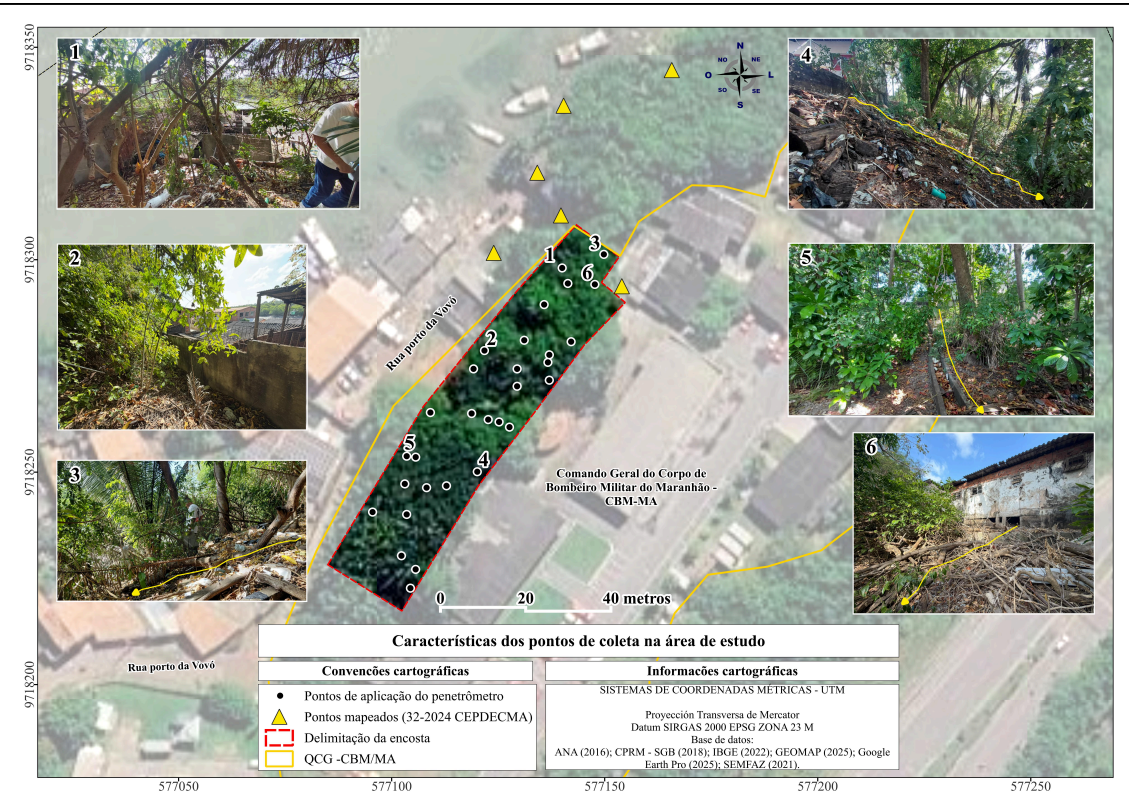
Ao observar os mapas das figuras 9 e 10 entre os anos de 2024 e 2026 entende-se que apesar de os pontos mapeados serem distintos, ainda compartilham as mesmas características: intenso descarte de resíduos sólidos, entulho de construção, déficit em estrutura de drenagem (imagem 5 – fig. 10) e degradação de estruturas do topo e da base da encosta (imagem 6 e 2 respectivamente – fig.10).

Figura 9. Pontos levantados pelo parecer nº 32/2024



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Figura 10. Pontos de coleta do penetrômetro



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

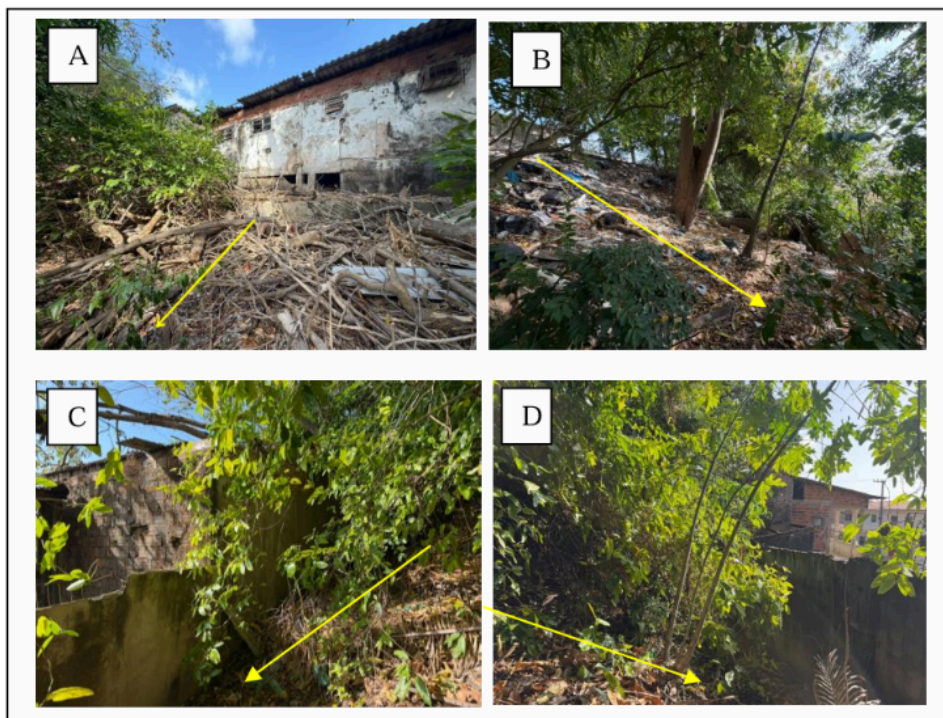
Os resultados do PenetroLOG apresentam os locais com maior indicação de resistência à penetração no solo e acrescentam uma

informação que não estava presente nos levantamentos anteriores: a existência de variação quantitativa da resistência nos primeiros 20 cm do terreno, tanto vertical quanto espacialmente. Essa informação permite investigar os setores associados às manifestações superficiais anteriormente registradas.

Dessa maneira, os resultados indicam que a RP possui potencial para atuar como informação complementar na caracterização da encosta, principalmente por revelar diferenças não identificáveis apenas pela inspeção visual.

As figuras a seguir contribuem na compreensão do comportamento da resistência do solo frente ao resultado dos mapas de maiores valores de resistência e aos registros apresentados pelo parecer técnico citado anteriormente (Figura 11). A encosta é ocupada no topo por parte de estruturas do QGB-CBM e na base pelas residências dos moradores da comunidade.

Figura 11. Pontos de coleta com destaque para inclinação da encosta



Legenda: As setas indicam a direção do topo para a base da encosta.

A - Topo da encosta com estrutura degradada da policlínica do QCG-CBM/MA; B – Alta e média encosta com descarte irregular de resíduos sólidos; C – Média e baixa encosta com possível rastejo em direção a muro de residência da comunidade; D – Baixa encosta com estruturas residenciais de moradores da comunidade do Porto da Vovó.

Fonte: os autores, 2026.

4.4. Comparação com Huber e Souza

Huber e Souza (2014) investigaram a fragilidade do sistema relevo-solo por meio da resistência à penetração em Argissolos e Neossolos, utilizando penetrômetro de impacto e avaliando perfis em profundidades superiores às consideradas no presente estudo.

Um aspecto de interesse é o comportamento da RP em função da profundidade. Huber e Souza (2014) observaram menores valores nas camadas superficiais, seguidos de aumento da resistência nas profundidades subsequentes. No Porto da Vovó foi identificado o comportamento qualitativamente semelhante nos primeiros 20 cm: a RP média passou de 61,30 kPa a 1 cm para 206,13 kPa a 5 cm, 543,67 kPa a 10 cm e 854,40 kPa a 15 cm.

A semelhança aqui foi entendida como comportamental, e não como equivalência numérica. Huber e Souza utilizaram equipamento e procedimento diferentes, investigaram Argissolos e Neossolos em diferentes locais e alcançaram profundidades de até aproximadamente 70 cm. No presente estudo foi empregado o PenetroLOG PLG2040, com cone tipo 1, resolução de 1 cm e profundidade máxima de 20 cm.

A principal contribuição de Huber e Souza (2014) para a interpretação dos resultados, encontra-se justamente nas limitações identificadas pelos autores. O estudo não estabeleceu uma relação universal entre RP e suscetibilidade à erosão. Diferentes classes de solo puderam apresentar comportamentos semelhantes, evidenciando que a resistência à penetração deve ser interpretada em conjunto com outras propriedades e condições ambientais.

O resultado possui implicação direta para o Porto da Vovó. O fato de determinado ponto apresentar 800 kPa de média e outro 135 kPa não permite afirmar, apenas com base nesses números, que o solo em dado ponto seja mais estável ou seguro que o outro.

Da mesma forma, a maior resistência observada em torno de 15 cm não significa que essa profundidade corresponda a uma camada estabilizadora da encosta. O resultado demonstra somente que o solo ofereceu maior resistência à penetração do cone nessa faixa durante o levantamento realizado.

A comparação com Huber e Souza (2014), portanto, reforça duas conclusões: a RP é capaz de revelar diferenças importantes no comportamento físico do terreno; porém essas diferenças precisam ser contextualizadas (Quadro 1).

Quadro 1. Comparação entre o presente estudo e Huber e Souza

Aspecto	Porto da Vovó	Huber e Souza
Equipamento utilizado	Penetrômetro digital PenetroLOG PLG2040, com cone tipo 1	Penetrômetro de Impacto IAA/Planalsucar-Stolf
Profundidade investigada	1 a 20 cm, com 30 perfis e 600 observações.	Até aproximadamente 70 cm.
Característica do local de aplicação	Encosta urbana, cobertura vegetal, movimentos de massa, elevada declividade, resíduos sólidos e intervenções humanas.	Argissolos e Neossolo, em condições controladas/comparáveis de declividade (10–20%), umidade e cobertura vegetal.
Comportamento vertical da resistência à penetração	Menores valores nas camadas superficiais, com aumento progressivo da RP em subsuperfície. Média de 61,30 kPa a 1 cm; 206,13 kPa a 5 cm; 543,67 kPa a 10 cm; máximo médio de 854,40 kPa a 15 cm; 773,70 kPa a 20 cm.	As classes de solo apresentaram curvas semelhantes de RP nas condições analisadas; o estudo permitiu avaliar variações da resistência com a profundidade e a influência das condições físicas, incluindo compactação e umidade.
Finalidade da RP	Caracterizar a heterogeneidade física superficial e investigar sua relação com condições e evidências associadas aos movimentos de massa.	Avaliar a fragilidade do sistema relevo-solo e sua relação com a suscetibilidade à erosão.
Principais limitações para comparação/uso	Profundidade limitada a 20 cm; ausência de medição simultânea da umidade; de parâmetros de resistência ao cisalhamento; RP não permite, isoladamente,	Resultados condicionados ao tipo de solo, umidade, cobertura vegetal e declividade; classes distintas apresentaram respostas semelhantes, limitando o emprego

	classificar estabilidade/instabilidade.	isolado da RP para diferenciar suscetibilidade.
Comparabilidade entre os estudos	A comparação deve ser qualitativa/comportamental, não baseada em equivalência dos valores absolutos de RP.	Equipamento, procedimento, profundidade e características pedológicas diferem do presente estudo.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026), com base em Huber e Souza (2014).

4.5. Contribuições e Limitações dos Resultados Obtidos com o PenetroLOG

Os resultados demonstram que o PenetroLOG PLG2040 foi capaz de produzir um conjunto quantitativo e georreferenciado de informações sobre os primeiros 20 cm do terreno. Os 600 registros permitiram identificar elevada variabilidade geral, comportamento vertical sistemático e diferenças entre os locais investigados.

A principal contribuição em relação às avaliações anteriores realizadas no Porto da Vovó consiste justamente na introdução de uma medida quantitativa de campo. Os documentos técnicos anteriores registraram características geomorfológicas, processos erosivos, condições de drenagem e manifestações de movimentos de massa (Cepdecma, 2020; Cepdecma, 2024), enquanto o levantamento atual acrescenta perfis numéricos de resistência à penetração associados às respectivas posições espaciais.

A profundidade máxima de 20 cm restringe as conclusões às condições superficiais e subsuperficiais rasas. Apesar de o equipamento utilizado medir em 40 e 60 cm, vale ressaltar que

atingir esse nível de profundidade não foi possível a grande quantidade de pequenas rochas na subsuperfície da encosta.

Outra limitação importante é a ausência de medição simultânea do teor de água em cada ponto. Como a RP é sensível às condições de umidade (Busscher, 1990; Bengough *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2021; Lardy *et al.*, 2022). Embora tenham sido observadas condições superficiais predominantemente secas durante o levantamento de campo, não foi realizada determinação quantitativa do teor de água. Assim, não foi possível avaliar a influência da umidade sobre a variabilidade da RP.

Além disso, não foram determinados diretamente parâmetros como coesão, ângulo de atrito interno ou resistência ao cisalhamento. Dessa forma, não existe fundamento experimental para converter os valores de RP obtidos em fator de segurança ou em uma classificação geotécnica de estabilidade.

4.6. Síntese dos Resultados e Resposta Ao Problema da Pesquisa

Os resultados obtidos demonstram que a resistência à penetração apresenta expressiva variabilidade vertical e entre os pontos investigados. A média geral foi de 518,93 kPa, com CV de 79,19%, enquanto a análise por profundidade revelou aumento da RP desde as camadas superficiais até aproximadamente 15 cm, seguido de manutenção de valores relativamente elevados até 20 cm.

A variação entre os perfis também foi relevante, com médias individuais entre 135 e 800 kPa. Esses resultados demonstram que os primeiros 20 cm da encosta apresentam comportamento heterogêneo quanto à resistência à penetração.

Em relação ao problema da pesquisa, os resultados disponíveis permitem afirmar que o PenetroLOG fornece informações quantitativas adicionais sobre a variabilidade física superficial da encosta, que podem ser confrontadas com as condições e evidências de movimentos de massa documentadas na área.

Essa conclusão está de acordo com Huber e Souza (2014), que também demonstraram as limitações da utilização isolada da resistência à penetração na interpretação de processos de vertente. Dessa forma, a contribuição do PenetroLOG reside menos na definição de valores críticos e mais na possibilidade de identificar diferenças verticais e espaciais do terreno que complementem outras informações geotécnicas e ambientais.

Portanto, a resistência à penetração deve ser compreendida, no contexto da Comunidade Porto da Vovó, como uma variável complementar de investigação. Os resultados permitem demonstrar quantitativamente que existem diferenças físicas nos primeiros 20 cm do terreno e fornecem uma base objetiva para que essas diferenças sejam analisadas conjuntamente com drenagem, processos erosivos, cobertura do solo e evidências de movimentos de massa.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo analisar a resistência do solo à penetração, obtida *in situ* com o PenetroLOG PLG2040 na encosta da Comunidade Porto da Vovó, em São Luís/MA. A investigação permitiu acrescentar informações quantitativas de campo às avaliações técnicas anteriormente realizadas na área, predominantemente fundamentadas em inspeções visuais e na

identificação de condicionantes geomorfológicos, ambientais e antrópicos.

Foram analisados 30 perfis de resistência à penetração, com registros entre 1 e 20 cm de profundidade e resolução de 1 cm, totalizando 600 observações. O conjunto apresentou resistência média de 518,93 kPa, mediana de 497,00 kPa, valor máximo de 1.863 kPa e coeficiente de variação de 79,19%, evidenciando elevada heterogeneidade dos valores registrados. A análise vertical demonstrou aumento da RP nas camadas subsuperficiais, passando de média de 61,30 kPa a 1 cm para 543,67 kPa a 10 cm e atingindo 854,40 kPa aos 15 cm, com posterior redução para 773,70 kPa aos 20 cm.

Os resultados demonstraram, portanto, que os primeiros 20 cm do terreno investigado apresentam variações expressivas de resistência tanto em profundidade quanto entre os pontos. No entanto, deve-se considerar que a resistência à penetração é influenciada por características distintas do solo, o que limita a associação direta entre determinado valor de RP e a ocorrência de movimentos de massa na encosta estudada.

A comparação com Huber e Souza (2014) mostrou semelhança qualitativa quanto à ocorrência de menores resistências nas camadas mais superficiais e aumento da RP em profundidade. Contudo, diferenças de equipamentos, profundidades investigadas, características dos solos e condições ambientais impedem a comparação direta dos valores absolutos. Além disso, os próprios autores não estabeleceram uma relação simples e universal entre resistência à penetração e suscetibilidade, reforçando a necessidade de interpretar a RP em conjunto com outros atributos do terreno.

Nesse sentido, não foi estabelecido neste trabalho qualquer valor-limite de resistência à penetração para classificar o solo como estável ou instável. A principal contribuição do ensaio consiste em fornecer uma informação quantitativa complementar sobre a heterogeneidade física superficial da encosta, permitindo que seus padrões verticais e espaciais sejam confrontados com os detritos de cobertura vegetal, descarte irregular de resíduos e entulhos de construção associados aos movimentos de massa.

Conclui-se, assim, que o PenetroLOG PLG2040 apresenta aplicabilidade como ferramenta complementar na investigação de encostas, especialmente pela possibilidade de obtenção rápida de perfis quantitativos e georreferenciados de resistência à penetração.

No caso da Comunidade Porto da Vovó, sua utilização ampliou a caracterização disponível sobre as condições superficiais e subsuperficiais rasas do terreno e forneceu informações complementares para a interpretação das condições associadas aos movimentos de massa. Diante disso, recomenda-se, para estudos futuros, associar a RP à determinação do teor de umidade, caracterização física dos solos, ensaios de resistência ao cisalhamento e investigações em maiores profundidades, possibilitando aprofundar a compreensão das relações entre as propriedades do solo e os processos de instabilidade observados na área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEOTTI, P.; CHOWDHURY, R. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 58, n. 1, p. 21–44, 1999.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS – ASABE. ASAE EP542.1: Procedures for Using and Reporting Data Obtained with the Soil Cone Penetrometer. St. Joseph, Michigan, 2019.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS – ASABE. ASAE S313.3: Soil Cone Penetrometer. St. Joseph, Michigan, 1999.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: **Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas**, 1., 1992, Rio de Janeiro. Anais [...] Rio de Janeiro: ABMS/ABGE, 1992. v. 2, p. 721–733.

BATISTA, B. M.; ROSÁRIO JUNIOR, E. S.; RODRIGUES, A. S.; YAMANAKA, F. M.; FRANÇA, C. D. V.; TEIXEIRA, M. R. Avaliação espacial e pericial dos impactos socioambientais decorrentes de eventos pluviométricos extremos no Estado do Pará (2025). *Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro*, v. 13, n. 15, p. 1–30, 2026. DOI: 10.66104/gyvfyw83.

BENGOUGH, A. G.; CAMPBELL, D. J.; O’SULLIVAN, M. F. Penetrometer techniques in relation to soil bulk density and water content. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. (ed.). **Soil and Environmental Analysis: Physical Methods**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 2001.

BISHOP, A. W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. **Géotechnique**, v. 5, n. 1, p. 7–17, 1955.

BORTOLOZO, C. A.; MENDES, T. S. G.; MOTTA, M. F. B.; SIMÕES, S. J. C.; PRYER, T.; METODIEV, D.; ANDRADE, M. R. M.; MORAES, M. V.; PAULA, D. S.; BASTOS, N. J.; PAMPUCH, L. A.; MENDES, R. M.; MORAES, M. A.

E. Obtaining 2D soil resistance profiles from the integration of electrical resistivity data and Standard Penetration Test (SPT) and Light Dynamic Penetrometer (DPL) resistance tests—applications in mass movements studies. **International Journal of Geosciences**, v. 14, n. 9, p. 840–854, 2023.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, v. 33, n. 2, p. 519–524, 1990.

COORDENADORIA ESTADUAL DE PROTEÇÃO E DEFESA CIVIL DO MARANHÃO – CEPDECMA. Parecer Técnico nº 01/2020: avaliação de risco na área do QCG/CBMMA e Comunidade Porto da Vovó. São Luís: CEPDECMA, 2020.

COORDENADORIA ESTADUAL DE PROTEÇÃO E DEFESA CIVIL DO MARANHÃO – CEPDECMA. Parecer Técnico nº 22/2022: avaliação de área de risco na região da Comunidade Porto da Vovó. São Luís: CEPDECMA, 2022.

COORDENADORIA ESTADUAL DE PROTEÇÃO E DEFESA CIVIL DO MARANHÃO – CEPDECMA. Parecer Técnico nº 32/2024: avaliação de risco geológico-geotécnico na Comunidade Porto da Vovó, São Luís/MA. São Luís: CEPDECMA, 2024.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO MARANHÃO – CBMMA. Relatório Técnico de Engenharia nº 15/2019: avaliação do risco de deslizamento do maciço de encosta na divisa do QCG/CBMMA e Comunidade Porto da Vovó, Vila Bacanga, São Luís/MA. São Luís: CBMMA, 2019.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslide types and processes. In: TURNER, A. K.; SCHUSTER, R. L. (ed.). **Landslides: Investigation and Mitigation**. Washington, DC: Transportation Research Board, 1996. p. 36–75.

FALKER AUTOMAÇÃO AGRÍCOLA LTDA. PenetroLOG PLG2040: medidor digital de compactação do solo: manual de instruções. Rev. B. Porto Alegre: Falker, 2020.

FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; CASCINI, L.; LEROI, E.; SAVAGE, W. Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. **Engineering Geology**, v. 102, n. 3–4, p. 85–98, 2008.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (org.). **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2000.

FRANÇA, C. D. V. et al. Proteção e defesa civil: sob a perspectiva de atendimentos no território maranhense. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, Curitiba, v. 21, n. 12, p. 25171–25188, 2023. DOI: 10.55905/oelv21n12-094.

GRECO, R.; MARINO, P.; BOGAARD, T. A. Recent advancements of landslide hydrology. *WIREs Water*, v. 10, n. 6, e1675, 2023. DOI: 10.1002/wat2.1675.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (org.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 1984.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. The Landslide Handbook: A Guide to Understanding Landslides. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2008.

HUBER, R.; SOUZA, B. S. P. e. Estudo da fragilidade do relevo-solo através da resistência à penetração de estaca em Argissolos e Neossolos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 3, 2014.

LARDY, G. P. et al. Effects of soil bulk density and water content on penetration resistance. **Agricultural & Environmental Letters**, v. 7, 2022.

LI, Y.; DUAN, W. Decoding vegetation's role in landslide susceptibility mapping: an integrated review of techniques and future directions. *Biogeotechnics*, v. 2, n. 1, art. 100056, 2024.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. The analysis of the stability of general slip surfaces. **Géotechnique**, v. 15, n. 1, p. 79–93, 1965.

OLIVEIRA, M. X.; SOUZA, B. S. P. e. Fragilidade de vertentes: resistência à penetração versus taxa de infiltração em diferentes subordens de Argissolo na área urbana de São Pedro do Sul/RS. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, v. 25, p. 37–55, 2013.

PINTO, M. G. P.; OLIVEIRA, P. G.; JORGE, E. L. O.; SOARES, L. M. M.; RODRIGUES, A. S.; YAMANAKA, F. M.; MATOS, L. G. H.; CARDOSO, A. A. A.; FRANÇA, C. D. V.; SILVA, P. H. M.; TEIXEIRA, M. R. Chuvas extremas e desastres ambientais no Pará: uma análise espacial dos danos socioambientais recentes (2022–2024). *Revista de Gestão Social e*

Ambiental, v. 19, n. 11, p. 1–17, e013751, 2025. DOI: 10.24857/rgsa.v19n11-022.

QUEVEDO, R. P.; VELASTEGUI-MONTOYA, A.; MONTALVÁN-BURBANO, N.; MORANTE-CARBALLO, F.; KORUP, O.; RENNO, C. D. et al. Land use and land cover as a conditioning factor in landslide susceptibility: a literature review. **Landslides**, v. 20, p. 967–982, 2023.

ROCHA, I. P.; FRANÇA, C. D. V.; SILVA, M. C.; PIRES, W. S. M.; AGUIAR, T. F.; LIMA, L. S.; COSTA, V. A. Rio Mearim e os riscos de desastres urbanos e ambientais: atuação da Defesa Civil estadual em um município do nordeste brasileiro. *Peer Review*, v. 5, n. 8, 2023. DOI: 10.53660/426.prw1112.

SALMAN, N. D.; KISS, P. Application of two techniques used for measuring the soil strength: a review. *Hungarian Agricultural Engineering*, n. 39, 2021.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SILVA, G. F. P.; AMARAL, A. C.; MOURA, R. R. S.; SILVA, C. C.; RODRIGUES, A. S.; YAMANAKA, F. M.; MATOS, L. G. H.; CARDOSO, A. A. A.; FRANÇA, C. D. V.; TEIXEIRA, M. R. Estudo espacial e análise pericial dos impactos socioambientais causados por eventos de alta pluviosidade no Estado do Pará em 2024. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 19, n. 11, p. 1–19, e013792, 2025a. DOI: 10.24857/rgsa.v19n11-037.

SILVA, V. B.; RODRIGUES, A. S.; CARDOSO, A. A. A.; YAMANAKA, F. M.; MATOS, L. G. H.; SANTOS, C. A. O.; FRANÇA, C. D. V.; TEIXEIRA, M. R. Geotecnologias em perícias ambientais: análise de aplicação de ferramentas que fornecem embasamento em casos de desastres meteorológicos no Pará. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 19, n. 12, p. 1–17, e013700, 2025b. DOI: 10.24857/rgsa.v19n12-012.

VARNES, D. J. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. Paris: UNESCO, 1984.

WANG, H.; WANG, L.; HUANG, X.; GAO, W.; REN, T. An empirical model for estimating soil penetrometer resistance from relative bulk density, matric potential, and depth. **Soil and Tillage Research**, v. 208, art. 104904, 2021.

YOSHIHARA, N.; UMEZAWA, R. Combining portable cone penetration test and electrical resistivity tomography to assess residual risks after shallow landslides: a case at the Hokkaido Eastern Iburi earthquake in 2018 in Japan. **Landslides**, v. 20, p. 2171–2185, 2023.

ZHANG, Z.; ZENG, R.; MENG, X.; ZHAO, S.; WANG, S.; MA, J.; WANG, H. Effects of changes in soil properties caused by progressive infiltration of rainwater on rainfall-induced landslides. **Catena**, v. 233, art. 107475, 2023.

¹ Discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético (PPGINDE) da Universidade Federal do Pará (UFPA), Campus Universitário de Tucuruí. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético (PPGINDE) da Universidade Federal do Pará (UFPA), Campus Universitário de Tucuruí. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

³ Discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético (PPGINDE) da Universidade Federal do Pará (UFPA), Campus Universitário de Tucuruí. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁴ Mestrando em Geografia Natureza e Dinâmica do Espaço da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA); E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁵ Doutorando em Geografia, UEMA, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁶ Mestranda em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético da Universidade Federal do Pará, Campus Belém-Pará, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁷ Discente do Programa de Pós-graduação em Geografia (PPGEO) da Universidade Estadual do Maranhão. Cidade Universitária Paulo VI. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁸ Mestre em Defesa e Segurança Civil pela Universidade Federal Fluminense. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁹ Mestrando em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Universidade Federal do Pará, Campus Tucuruí. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

¹⁰ Graduado em Geografia, Universidade Estadual do Maranhão,
Brasil

E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

¹¹ Mestranda em Biociências Aplicadas à Saúde, CEUMA, Brasil. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

¹² Doutor em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo – USP.
E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)