

Caracterização Geotécnica dos Solos da Região Amazônica, por Meio de Ensaios Piezocone, para Análise do Fenômeno de Terras Caídas

Gisleine Coelho de Campos

Pesquisadora, IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo, Brasil, gisleine@ipt.br

Claudio Luiz Ridente Gomes

Pesquisador, IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo, Brasil, aranha@ipt.br

Felipe Schaefer Santos

Pesquisador Jr., FIPT-Fundação do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo, Brasil, felipess@ipt.br

RESUMO: A região amazônica ainda hoje carece de recursos para a realização de ensaios de investigação geológico-geotécnica, tendo a maior parte dos projetos de obras civis pautada exclusivamente em ensaios à percussão, com medida do índice de resistência à penetração SPT (*Standard Penetration Test*). Para melhor entendimento do fenômeno de Terras Caídas, típico da região amazônica e que, por vezes, acaba afetando a integridade e estabilidade das obras lindeiras às margens dos rios, fez-se uma campanha de ensaios de piezocone próxima à região de Manaus, no Estado do Amazonas. Nesse artigo, além de uma breve contextualização do fenômeno de Terras Caídas, apresentam-se os dados das bibliografias de referência da região, dados de sondagens à percussão e os resultados dos ensaios de piezocone, com seus diferentes parâmetros. A partir dos dados bibliográficos e dos resultados e correlações dos ensaios de piezocone, faz-se uma proposição de parâmetros geotécnicos para projetos e estudos de estabilidade das margens dos rios na região, como forma de contribuição para o aumento do conhecimento dos solos amazônicos.

PALAVRAS-CHAVE: Piezocone, Solos, Parâmetros Geotécnicos, Terras Caídas, Região Amazônica.

ABSTRACT: The Amazon Region still lacks resources to carry out geological-geotechnical investigation tests, with the majority of civil works projects being based exclusively on percussion tests, measuring the penetration resistance index SPT (*Standard Penetration Test*). To better understand the Fallen Lands phenomenon, typical of the Amazon region and which, at times, ends up affecting the integrity and stability of works along river banks, a piezocone testing campaign was carried out near Manaus city, in State of Amazonas. In this article, in addition to a brief contextualization of the Fallen Lands phenomenon, data from reference bibliographies of the region, data from boreholes with SPT index and the results of piezocone tests are presented, with their different parameters. Based on bibliographic data and the results and correlations of piezocone tests, a proposal is made for geotechnical parameters for design and stability studies of river banks in the region, as a way of contributing to increasing knowledge of amazonian soils.

KEYWORDS: Piezocone, Soils, Geotechnical Parameters, Fallen Lands, Amazon Region.

1 INTRODUÇÃO

Os recentes avanços e novas tecnologias de investigação dos solos têm auxiliado, sobremaneira, a estimativa de parâmetros de resistência e de deformabilidade representativos do comportamento de diferentes tipos de solos. A representatividade dos parâmetros é fator fundamental para o sucesso da

aplicação de modelos de previsão de comportamento, largamente utilizados em diversos projetos de obras geotécnicas.

No entanto, na região norte do Brasil, muitas obras são ainda projetadas e construídas tendo como dados de entrada apenas os resultados de sondagens de simples reconhecimento à percussão, com medidas do índice de resistência à penetração N do SPT (*Standard Penetration Test*). A partir dos valores de N_{SPT} , complementados com ensaios em ambiente laboratorial, foram definidos diversos parâmetros considerados representativos do comportamento do solo local, hoje utilizados nos estudos de projetos de fundações e na análise da estabilidade de taludes.

Visando contribuir para um melhor conhecimento dos solos da região, fez-se uma campanha de ensaios piezocone em duas diferentes áreas (ilhas de investigação próximas e com características geológico-geotécnicas similares), situadas a menos de 30 km de Manaus. Nestas áreas já haviam sido realizadas para o presente estudo, previamente, sondagens de simples reconhecimento à percussão, cabendo destacar que, nas duas localidades, havia evidências de ocorrência do fenômeno conhecido como Terras Caídas, típico da região amazônica, que sofre variações do nível de água em suas planícies de mais de 10 m entre os períodos de cheia e de vazante.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Sob o ponto de vista geológico, as duas ilhas de investigação se inserem no contexto regional da Bacia Sedimentar do Amazonas, na confluência dos rios Negro e Solimões (Figura 1). A Bacia Sedimentar do Amazonas é constituída, principalmente, por rochas sedimentares paleozoicas e mesozoicas, e também, por sedimentos inconsolidados do Terciário. Tais rochas sedimentares estão depositadas sobre um substrato rochoso pré-cambriano, constituído por rochas ígneas, metamórficas e sedimentares (CPRM, 2010).

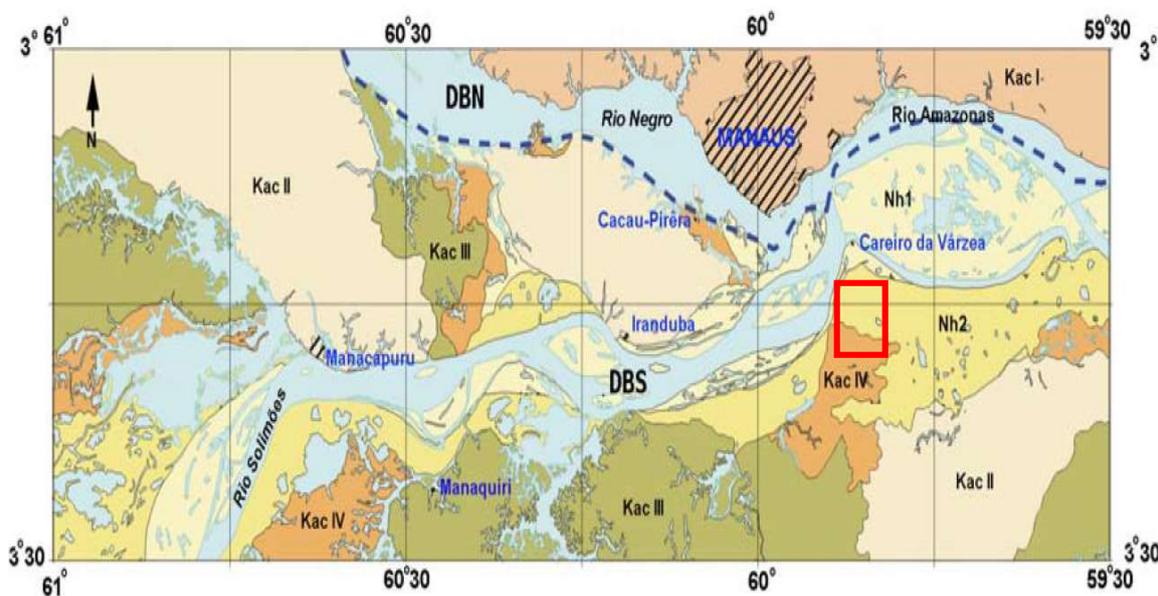


Figura 1. Principais morfounidades da Formação Alter do Chão (Kac) e holocênicas (Nh) dos domínios Baixo Negro e Baixo Solimões. O retângulo vermelho destaca a região onde estão as áreas de estudo.

Fonte: Reis *et al.* (2006).

Coberturas aluvionares do Quaternário ocorrem amplamente próximas às principais redes de drenagem, ocupando grande parte da superfície da bacia sedimentar. No que diz respeito aos sedimentos aluvionares, estes podem ultrapassar os 20 m de profundidade (Muller *et al.*, 1995; Sarges, 2007), variando de argila à areia, com ocorrências de cascalhos localizados, nos mais variados graus de consistência e compacidade (Aragão *et al.*, 2006; Souza *et al.*, 2021).

Geralmente, esses sedimentos aluvionares apresentam resistência geomecânica baixa e coesão moderada à baixa, exceto quando laterizados (Queiroz & Alves, 2021; Souza *et al.*, 2021). A variação

granulométrica se dá segundo o ambiente deposicional dos sedimentos, sendo que os arenosos ocorrem predominantemente nos ambientes de canais e diques marginais, enquanto os materiais coesivos ocorrem preferencialmente nas planícies de inundação.

Um fenômeno típico observado nas margens dos canais, também afetando porções das planícies, é denominado “Terras-Caídas”, terminologia regional usada de modo generalizado para definir processos de erosão fluvial como desmoronamentos e deslizamentos que afetam todos os anos populações e instalações ribeirinhas (Souza & Campelo, 2020), oferecendo riscos até mesmo à navegação fluvial.

As “Terras-Caídas” ocorrem preferencialmente em aluviões recentes, constituídos por camadas de areias e argilas inconsolidadas, combinando-se aos processos de erosão fluvial nos períodos de cheia. Os fenômenos de movimento de massa como rastejos, escorregamentos rotacionais e translacionais ocorrem no período de estiagem, motivados pelo rápido rebaixamento do nível d’água dos rios. De modo geral, o processo de instabilização das margens, no seu estágio inicial, apresenta uma série de pequenos degraus de abatimento, associados a um conjunto significativo de pequenas trincas no terreno (Figura 2).

Os sistemas fluviais da Região Amazônica, além de funcionarem como canais de escoamento, exercem um forte controle sobre o transporte de sedimentos e condicionam sobremaneira a ação erosiva dos rios sobre o substrato geológico ao longo do tempo. As margens acabam se tornando mais sensíveis aos processos erosivos por estarem sujeitas à abrasão causada pelas águas e pela alteração dos gradientes hidráulicos que ocorre durante os sucessivos ciclos de enchente e vazante dos rios (Gamba *et al.*, 2017).

Alguns autores (Souza & Campelo, 2020; Gamba *et al.*, 2017, Igreja & Franzinelli, 2006) sugerem que a neotectônica também contribui para que o fenômeno de “Terras Caídas” aconteça, atuando em conjunto com fatores climáticos (precipitação pluviométrica e ventos), litológicos, morfológicos, sedimentológicos, hidrológicos e hidráulicos.



Figura 2. Diversas trincas e degraus de abatimento nas margens de rio, evidenciando o fenômeno de “Terras Caídas”. Fonte: Autores, 2022.

Em termos de parâmetros geotécnicos para os diferentes tipos de solo da região, Wolff (2014) fez uma compilação de dados, sumarizada na Tabela 1. Esses parâmetros foram obtidos por meio de correlações com ensaios à percussão (profundidades superiores a 25 m) e diversos ensaios laboratoriais, de cisalhamento direto e triaxiais, desenvolvidos por vários pesquisadores da região (Campelo *et al.*, 2001). Não há dados que permitam correlacionar as diferentes camadas às profundidades de sua ocorrência.

Cabe salientar que os solos da região, por serem majoritariamente lateríticos, apresentam comportamentos peculiares sob o ponto de vista geotécnico. Segundo Campelo *et al.* (2001) apud Wolff (2014, pag. 53) “As argilas de Manaus, que passaram por processos de intemperismo avançados, possuem ângulos de atrito maiores que os esperados e coesão, contrariamente, menor do que o imaginado para essa classe granulométrica. Supõe-se que a facilidade de formação de concreções lateríticas as aproximam do comportamento de solos com maior granulometria, por isso, tais solos manifestam comportamento geotécnico intermediário entre argilas e areias”.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos de solos na região estudada.

Descrição da Camada	Peso específico (kN/m ³)	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (graus)	Permeabilidade (m/s)
Aterro	16	10	25	10 ⁻⁰⁸
Areia argilosa	15	5	25	10 ⁻⁰⁶
Argila arenosa	15	10	20	10 ⁻⁰⁷
Areia argilosa siltosa	18	10	20	10 ⁻⁰⁵
Areia siltosa	20	5	30	10 ⁻⁰⁴
Argila orgânica	14	15	10	10 ⁻⁰⁸

Fonte: Wolff (2014).

3 METODOLOGIA DO ESTUDO

Para melhor caracterização das áreas de estudo e estimativa de parâmetros geotécnicos, fez-se uma campanha de ensaios de campo, composta por sondagens de simples reconhecimento à percussão e ensaios de piezocone. Devido a restrições locais, não foi possível a coleta de amostras indeformadas para a realização de ensaios laboratoriais complementares.

Foram realizados treze furos de sondagem à percussão, seguindo as recomendações das normas vigentes, com profundidade máxima de 45 m. A interpretação dos resultados, em termos de classificação tátil-visual das camadas perfuradas e dos seus respectivos índices de resistência à penetração, permitiu o estabelecimento do perfil estratigráfico do terreno.

Próximos aos furos de sondagens foram feitos nove ensaios de piezocone, com profundidade limitada a 35 m devido às características do equipamento. Além dos valores medidos diretamente pela ponteira instrumentada (resistência de ponta, atrito lateral e sobrepressão neutra), outros foram determinados usando-se correlações propostas por Lunne *et al.* (1997) e Robertson & Cabal (2022).

4 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CAMPO

A partir das sondagens de simples reconhecimento à percussão, interpreta-se que o perfil do subsolo da região é constituído por camadas aluvionares e produtos de alteração da Formação Alter do Chão, sem ocorrência de rochas até a profundidade de 40 m, máxima alcançada pelas sondagens.

Em superfície ocorre camada de aterro não controlado (argila plástica), executado após a realização das sondagens à percussão, e que foi interceptado pelos ensaios piezocone. Logo abaixo, com espessuras de 20 m a 30 m, ocorre camada aluvionar, composta por argila cinza e areia pouco siltosa. Abaixo da camada aluvionar verifica-se a ocorrência de solo de alteração da Formação Alter do Chão, até a profundidade final das sondagens, constituído por areia fina à média, branca.

A Figura 3 apresenta os valores médios de N_{SPT} sobre a estratigrafia simplificada idealizada para o terreno local, onde fica evidente o fato de se ter resistências praticamente constantes com a profundidade nos primeiros 10 a 12 m do terreno natural (argila siltosa/silte argiloso), abaixo do aterro. Destaca-se que, entre 3,5 e 5,0 m de profundidade tem-se uma camada de transição entre o aterro e a argila de consistência mole, a qual fica mais evidente nas variações paramétricas observadas nos ensaios de piezocone. Salienta-se que, neste trabalho, a profundidade zero equivale, aproximadamente, à cota 104 m da região.

Como já mencionado, para complementar a investigação de campo, foram realizados ensaios de piezocone próximos das sondagens à percussão, com a diferença de que, em alguns pontos, a espessura de aterro encontrava-se maior no momento da execução dos piezoncones devido às obras em andamento nas áreas estudadas.

Os ensaios de piezocone consistem na penetração de um cone de aço, forçado de maneira estática no terreno, a uma velocidade de penetração constante igual a 2 cm/s, com leituras simultâneas das seguintes medidas: resistência de ponta, resistência ao atrito lateral, sobrepressão neutra, inclinação do cone e

velocidade de cravação. Para a leitura das pressões neutras foi utilizada pedra porosa, previamente saturada, localizada na base do cone, como ilustra a Figura 4.

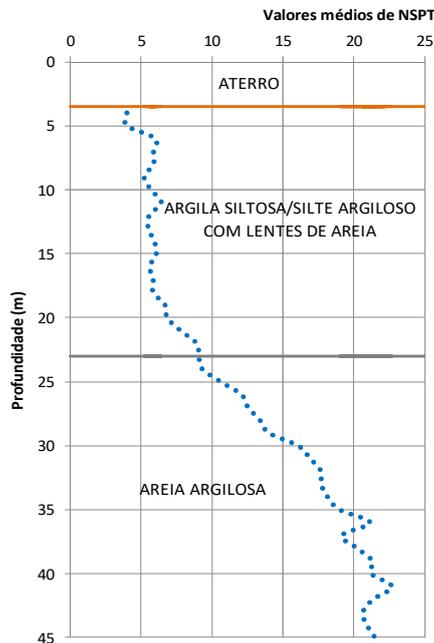


Figura 3. Estratigrafia do local, com valores médios do índice de resistência à penetração (13 ensaios).

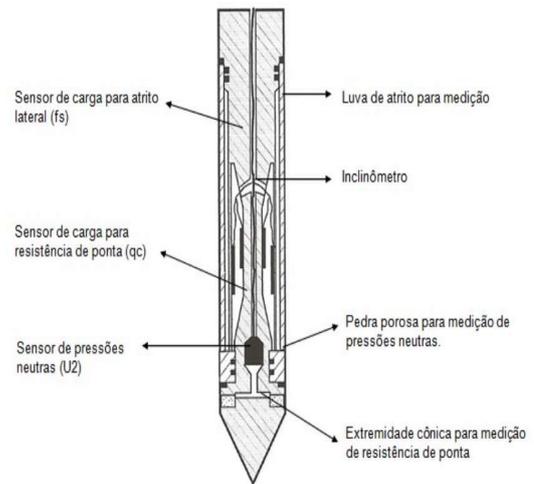


Figura 4. Piezocone usado nos ensaios.
 Fonte: Damasco Penna, 2024.

Os valores médios medidos nos nove ensaios piezocone realizados são apresentados na Figura 5. Nos gráficos desta figura encontram-se as delimitações das camadas de solo apontadas na estratigrafia simplificada da Figura 2, a fim de facilitar a interpretação dos resultados. No que concerne ao nível d'água, este foi encontrado entre 3,0 m e 9,0 m, podendo aflorar em superfície no período de cheias.

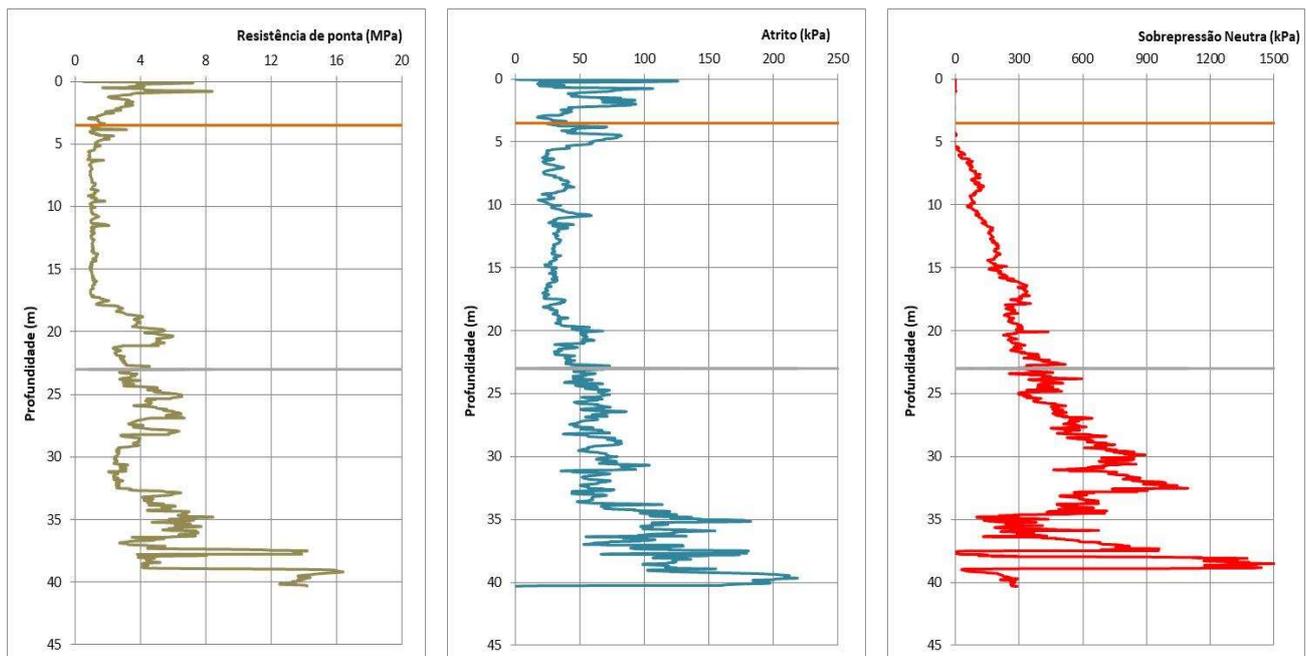


Figura 5. Resultados dos ensaios de piezocone (média de 9 ensaios).

A partir dos valores medidos e usando-se as correlações propostas pelos autores citados no item 3 para interpretação dos ensaios CPTu, outros parâmetros das diferentes camadas do terreno foram estimados. A Figura 6 apresenta a variação de alguns parâmetros dos solos em função da profundidade investigada, com a indicação das camadas superior de aterro, intermediária com a predominância de solos finos (com lentes de areia) e inferior, de material basicamente granular.

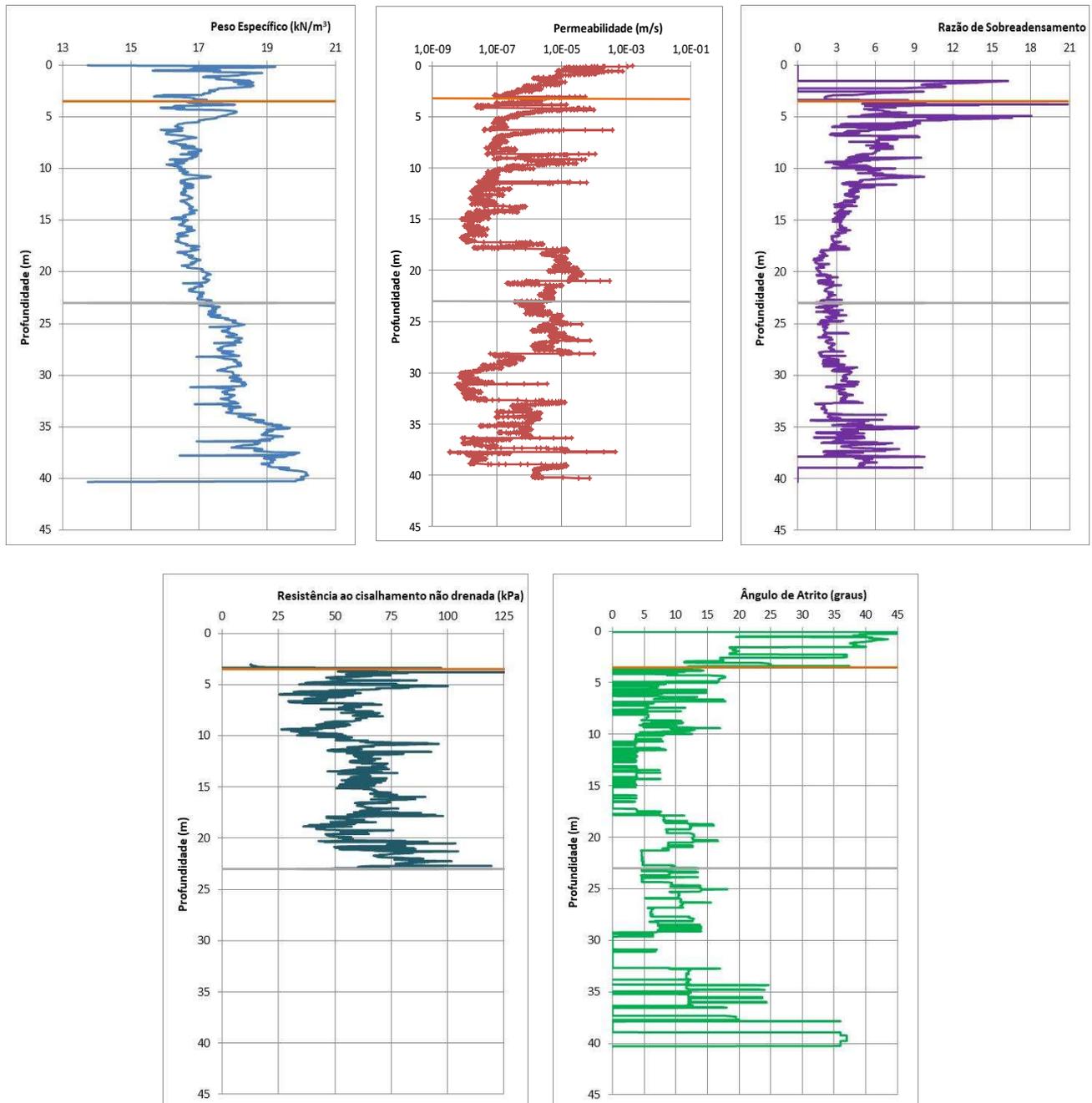


Figura 6. Parâmetros determinados a partir dos ensaios piezocone.

Da Figura 6, merecem destaque:

- a heterogeneidade de comportamento da camada superior de aterro, para a qual não foram registrados valores do índice de resistência à penetração;
- a razão de sobreadensamento do solo, que sugere a ocorrência de ressecamento das camadas mais superficiais do terreno e a variação do coeficiente de permeabilidade na camada de solo

predominantemente fino, confirmando a presença das prováveis lentes de areia que, muitas vezes, condicionam os movimentos de massa; e

- segundo Wolff (2014), como já citado anteriormente, a laterização da camada de solo argiloso faz com que seu comportamento se assemelhe ao de um solo granular, motivo pelo qual são apresentados os valores de ângulo de atrito para essa camada do terreno. A estimativa da razão de poro pressão (parâmetro B_q) pode auxiliar na interpretação desse comportamento.

Considerando-se os valores obtidos a partir dos ensaios de piezocone, apresentam-se na Tabela 2 os valores sugeridos para representar o comportamento dos solos exibidos na estratigrafia simplificada da Figura 3. Cabe salientar que estes valores, assim como os constantes nos diferentes gráficos apresentados, resultaram de valores médios calculados a partir de nove ensaios de piezocone e da adoção de uma estratigrafia bastante simplificada para os locais dos ensaios. A realização de novos ensaios na região se faz necessária para uma melhor avaliação dos resultados ora apresentados e para a inclusão de novos parâmetros de referência para as diferentes camadas de solo. Outras correlações também podem ser testadas para validar parâmetros usualmente empregados nos projetos geotécnicos da região.

Tabela 2. Parâmetros propostos para os solos da região.

Descrição da Camada	Peso específico (kN/m ³)	Resistência não drenada (kPa)	Ângulo de Atrito (graus)	Permeabilidade (m/s)
Aterro	17-19	--	25-35	10 ⁻⁶
Argila siltosa	16-17	50-70	5-15	10 ⁻⁷
Areia argilosa	18-20	--	15-25	10 ⁻⁵

Fonte: Autores, 2024.

Comparando-se os valores da Tabela 2 com os dados bibliográficos apresentados na Tabela 1, observa-se uma boa aproximação entre eles. Ressalta-se que, essa aproximação é mais contundente nos valores de ângulo de atrito. Tal fato reforça a premissa de que são necessários diferentes tipos de ensaios de investigação (de campo e de laboratório) para melhor entendimento do comportamento dos solos. Investir no planejamento e realização de investigações é o primeiro passo para a otimização de projetos e para a melhoria da qualidade final das obras civis.

5 CONCLUSÕES

Os dados bibliográficos disponíveis, associados aos resultados dos ensaios de piezocone realizados, permitem concluir que:

- Os solos dos sítios estudados na região amazônica apresentam grande heterogeneidade nas camadas mais superficiais, associada às características hidrodinâmicas dos rios, que promove o carreamento e deposição de muitos sedimentos nos períodos de cheia e, na época de vazante, contribui para os processos erosivos que se instalam nas margens e avançam, paulatinamente, para regiões mais distantes do leito original (fenômeno de Terras Caidas);
- Durante os processos de sedimentação e erosão, formam-se lentes de materiais diversos, podendo-se ter camadas com maior permeabilidade e resistência, que acabam condicionando a formação de superfícies de ruptura mais rasas;
- Em termos de parametria para estudos e projetos geotécnicos, o intervalo de valores obtidos em ensaios (de campo e de laboratório) é grande e diretamente associado à qualidade das amostras e aos tipos de ensaios de investigações geológico-geotécnicas de campo. No caso específico dos ensaios piezocone, ainda são muito poucos os dados disponíveis da região; investir em novos ensaios permitirá uma melhor discretização das camadas do subsolo e, por conseguinte, uma definição mais assertiva dos parâmetros geotécnicos de projeto, além de permitir correlações com as sondagens à percussão usualmente empregadas no local.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A pelo apoio ao desenvolvimento de projetos de pesquisa e à publicação dos seus resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAGÃO, A.F.; HORBE, A.M.C., CAMPELO, N.S., GERT, R.W. *Caracterização das argilas quaternárias para utilização em cerâmica vermelha – polo oleiro de Iranduba e Manacapuru – AM*. In: IX Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, Pará, Proceedings... Pará: 2006, p. 362-364.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. *Geodiversidade do Estado do Amazonas*, Manaus: CPRM, 2010, 275 p.
- CAMPELO, N.S.; CARNEIRO, B.J.I; ALBIERO, J.H.; CARVALHO, J.S. *Estabilidade de taludes naturais localizados na orla do Rio Negro e no pólo industrial de Manaus*. In: III Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, 2001, Rio de Janeiro. III COBRAE. Rio de Janeiro: ABMS, 2001, 8 p.
- GAMBA, C.T.C.; ROSA, R.A.S.; NOGUEIRA JR., J.B. *Identificação de processos erosivos às margens do Rio Madeira (RO/AM) a partir da interferometria diferencial por radar (DINSAR)*. In: XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, UNICAMP, Campinas, 2017.
- IGREJA, H.; FRANZINELLI, E. *Aspectos das “terras caídas” na Região Amazônica*. In: IX Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, Pará, Proceedings... Pará: 2006, p. 487-489.
- LUNNE, T.; ROBERTSON, P.K.; POWELL, J.J.M. *Cone penetration testing in geotechnical practice*. Londres, Blackie Academic & Professional, 1997.
- MÜLLER, J.; IRION, G.; MELLO, J.N.; JUNK, W. *Hydrological changes of the Amazon during the last glacial-interglacial cycle in central Amazonia (Brazil)*. *Naturwissenschaften*, v. 82, p. 232-235, 1995.
- QUEIROZ, M.S.; ALVES, N.S. *Conditioning factors of “terras caídas” in lower Solimões River – Brazil*. *Rev. Caminhos da Geografia*, v. 22, n. 80, p. 220-233, 2021.
- REIS, N.J.; D’ANTONA, R.J.G.; MAIA, M.A.M, ROSA, S.F.; NAVA, D.B. (2006). *Geologia e recursos minerais para uso na construção civil nos domínios Baixo Negro (DBN) e Baixo Solimões (DBS) – Amazonas*. In: IX Simpósio de Geologia da Amazônia, Pará, Proceedings... Pará: 2006, p. 335-338.
- ROBERTSON, P.K.; CABAL, K. *Guide to cone penetrating testing*. Gregg Drilling LLC, 2022.
- SARGES, R. R. *Relações entre as estruturas tectônicas, sedimentação coluvial e geomorfogênese da região de Manaus, Amazonas*. São Paulo, 2007, 109p. Tese de Doutorado no Programa de Geoquímica e Geotectônica do Instituto de Geociências da Universidade São Paulo, 2007.
- SOUZA, E.S.; CAMPELO, N.S. *Caracterização e modelagem geotécnica do fenômeno das Terras Caídas no ambiente amazônico*. Editora Dialética, Belo Horizonte, 2020.
- SOUZA, E.S.; CAMPELO, N.S.; LIMA, R.H.C.; AGUIAR, R.L. *Geotechnical characterization and modelling of the “Fallen Lands” phenomenon in the amazon environment*. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, v. 09, n.3, p. 122-132, 2021.
- WOLFF, Erich. *Gerenciamento de risco geotécnico aplicado a infraestruturas portuárias*. Brasília, 2014. 90p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2014.