

Características Geotécnicas dos Solos da Baixada Maranhense

Glauber Candia Silveira

Engeplus Engenharia e Consultoria Ltda, Porto Alegre/RS, Brasil, glauber.silveira@engeplus.eng.br

RESUMO: Através de extensa campanha de sondagens SPT na Baixada Maranhense, foi possível a caracterização geológico-geotécnica dos depósitos sedimentares existentes. A região se constitui de planícies flúvio-marinhas pertencentes ao Golfo Maranhense, com ocorrência de solos saturados de consistência muito mole a mole com intercalações de camadas arenosas. Anualmente, há forte oscilação do regime pluviométrico, com verões muito chuvosos e inundações alternados com invernos secos, o que provavelmente determinou o sobreadensamento da crosta. Ensaios de caracterização geotécnica foram utilizados para identificação complementar e reconhecimento dos perfis de solos, tanto na condição natural como em laboratório, indicando a presença de solos moles classificados como ML e OL, segundo o SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos).

PALAVRAS-CHAVE: Solos Moles, Baixada Maranhense, Geotecnia, Sondagens, Ensaios.

1 INTRODUÇÃO

A Baixada Maranhense (Figura 1) caracteriza-se por planícies flúvio-marinhas pertencentes ao Golfo Maranhense, com ocorrência de solos saturados de consistência muito mole a mole com intercalações de camadas arenosas. Anualmente, registra-se oscilação do regime pluviométrico, com verões muito chuvosos e inundações, alternados com invernos secos e períodos de estiagens, além de significativa influência de marés e intrusões de línguas salinas através da Baía de São Marcos

No desenvolvimento do Anteprojeto de Engenharia de um sistema de diques de terra foram realizados estudos geotécnicos de campo e laboratório ao longo de cerca de 70,6 km de extensão sobre as planícies da Baixada Maranhense, na costa ocidental da Baía de São Marcos. Estes estudos foram contratados pela CODEVASF e executados pelo Consórcio Engeplus-Proenge (2015).

A partir de estudos de traçado, foram definidos dois Eixos para o alinhamento dos diques. O Eixo 01 teve início junto à Rodovia MA-014 (há 10 km ao sul da cidade de Viana-MA), com traçado se desenvolvendo por 64,75 km na direção Sul-Norte até a cidade de Cajapió-MA, atravessando pelo menos 22

igarapés, sendo 4 considerados de grande porte (Boi Baiano, do Meio, Raposa e Cajapió). O Eixo 02, mais ao norte, com extensão de 5,85 km, teve início na chamada Ilha do Cravo, com traçado na direção Sul-Norte até o Povoado de “Em Trilha”, município de Bacurituba. O Eixo 02 interceptou apenas um igarapé de grande porte (igarapé Jiquiruna).

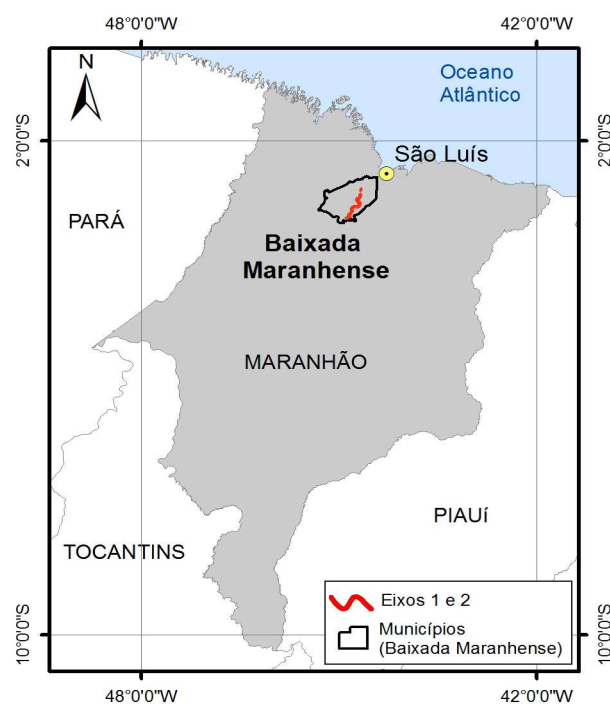


Figura 1. Macrolocalização da Baixada Maranhense.

A Figura 2 mostra a localização dos Eixos estudados, com a representação de segmentos com ocorrência de solos moles a muito moles. O afastamento dos eixos em relação às margens do Rio Mearim e da Baía de São Marcos variou entre 1,5 e 13,0 km, tendo em vista restrições ambientais, ocorrência de solos com piores condições geotécnicas e presença de extensos mangues nestas áreas.

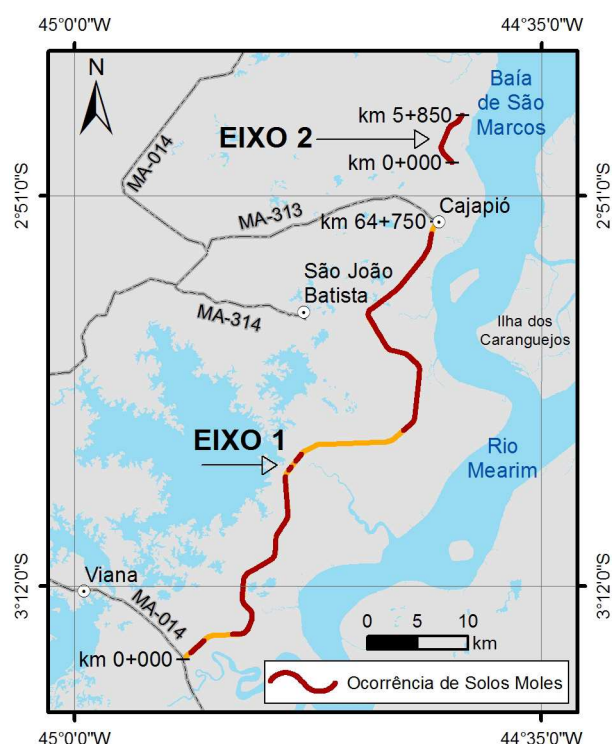


Figura 2. Localização dos Eixos 01 e 02.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Investigações Geotécnicas

Foram executados 519 furos de sondagem a percussão (SPT) nos Eixos 01 e 02, totalizando cerca de 5.800 m de sondagem, sendo elaborados perfis geológico-geotécnicos longitudinais ao longo da fundação dos diques. O espaçamento sistemático entre furos foi de 200 m, considerado adequado para o reconhecimento preliminar tendo em vista perspectiva da ocorrência de solos moles. Em locais de extravasores (vertedores) foram executadas sondagens SPT lateralmente ao eixo longitudinal dos diques, para estudo de seções geotécnicas transversais. A profundidade das

sondagens foi variável entre 10 e 20 m.

Além das sondagens a percussão, foram executadas 15 sondagens a trado, com espaçamento médio de 5 km entre furos. Foram recolhidas amostras da fundação natural, com profundidade até 5,00m para ensaios de caracterização geotécnica (análise granulométrica e plasticidade), visando à classificação dos solos. Em algumas sondagens SPT foram coletadas amostras em profundidade para a determinação do peso específico, teor de umidade natural e índice de vazios.

A campanha de investigações geotécnicas executada por quatro equipes de sondagem trabalhando simultaneamente foi realizada no período das estiagens na região, entre Agosto/2014 e Janeiro/2015, quando foi possível acesso terrestre. Nos demais meses do ano, praticamente toda a planície fica submersa devido às chuvas e inundações, sendo quase impossível o acesso de equipamentos. Mesmo nestas condições, nas margens dos igarapés, se identificaram solos lodosos e muito moles (Figura 3), bastante influenciados pelo regime das variações de marés (oscilação diária de 2 a 3 m).



Figura 3. Margens do Igarapé Raposa (Eixo 01, Estaca 51+600, Latitude: -2,966467° e Longitude: -44,732934°).

2.2 Normas Utilizadas

No desenvolvimento dos estudos geotécnicos foram utilizadas as seguintes Normas Técnicas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas): NBR 6459, NBR 6484, NBR 6508, NBR 7180, NBR 7181 e NBR 16097.

3 RESULTADOS OBTIDOS

O perfil topográfico do terreno natural, ao longo dos traçados, se situa tipicamente entre as cotas +3,50 m e +6,00 m, sendo que nas proximidades dos igarapés as depressões são inferiores, podendo alcançar a cota +0,00 m (alagadas). Foram elaborados perfis geológico-geotécnicos longitudinais contínuos para cada eixo, a partir dos resultados das sondagens SPT e trado, com identificação e delimitação das diversas camadas de solos (espessuras e tipo de solo), posicionamento do lençol freático e resultados de ensaios geotécnicos.

Observou-se que no Eixo 01 cerca de 3/4 (73,8%) das sondagens, e que no Eixo 02 praticamente todas as sondagens, revelaram ocorrência de solos argilosos moles a muito moles (com indícios de matéria orgânica de odor característico – Figura 4), eventualmente intercalados com delgadas camadas de areia, para profundidades pelo menos até 10,00 m. A Figura 5 mostra resultado ilustrativo de um furo de sondagem (Furo SP-V17.01, no Eixo 01).

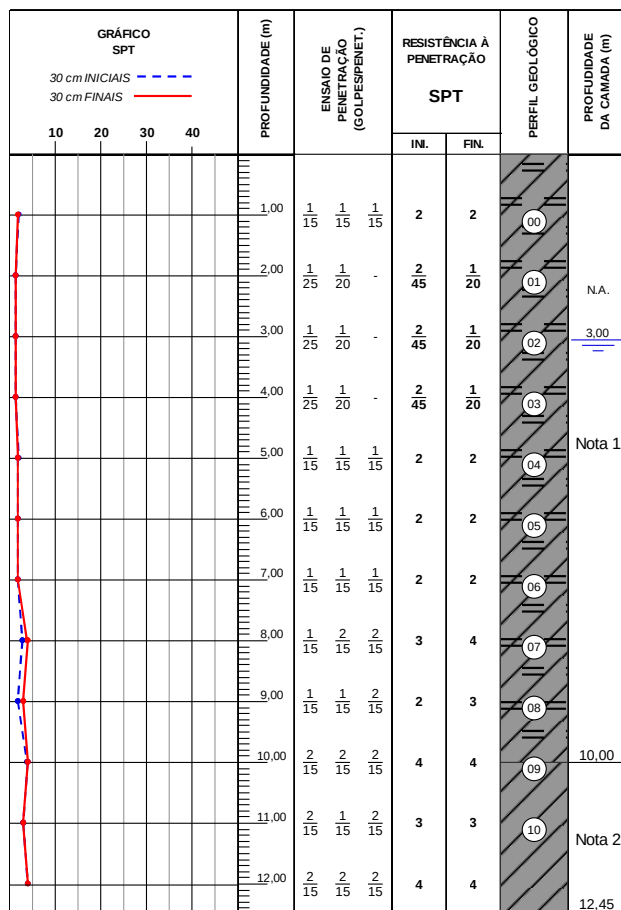


Figura 4. Sondagem SP-E1.34, Prof. 10,00 m, com presença de Matéria Orgânica (restos vegetais).

3.1 Perfis Geológico-Geotécnicos

No Eixo 01, 60,6% da extensão (39,25 km) foi enquadrado em apenas 4 perfis típicos, todos

com predominância de solos argilosos moles. Já no Eixo 02, 95,8% da extensão (5,60 km) apresentou enquadramento em 2 perfis típicos de solos argilosos moles. Basicamente, a presença ou não de matéria orgânica (Figura 4), natureza dos solos e variação nas espessuras das camadas moles, diferenciam os perfis.



NOTAS:

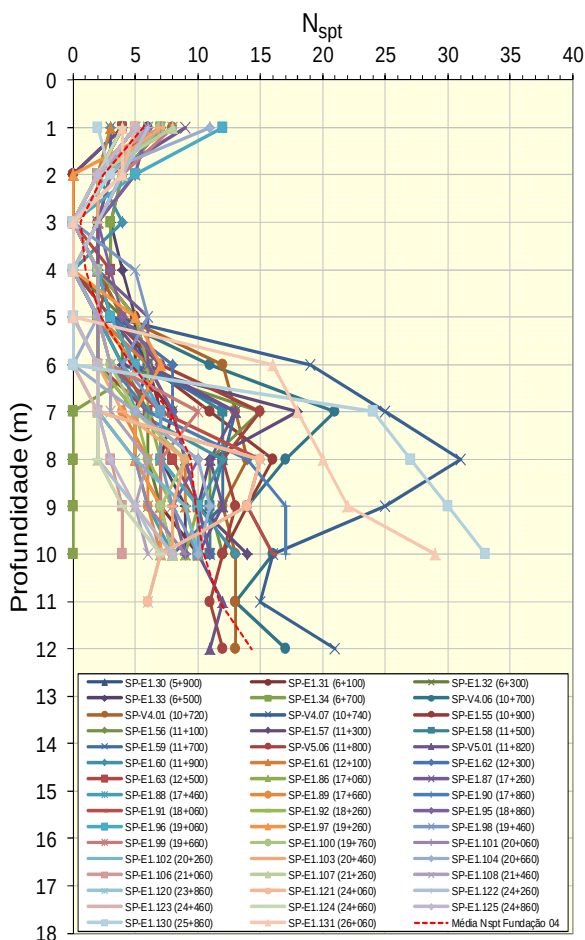
- 1 - ARGILA ORGÂNICA SILTOSA, MUITO MOLE A MOLE, COR CINZA ESCURA;
- 2 - ARGILA ORGÂNICA, MOLE, COR CINZA ESCURA;

Figura 5. Resultado do furo SP-V17.01 (Eixo 01, Estaca 51+670, Latitude: -2,966392° e Longitude: -44,732964°, Cota=3,857 m).

Superficialmente, em praticamente todos os perfis, foi detectada camada de argila siltosa mole, com gretas típicas de ressecamento (abertura de 1,0 a 3,0 cm) na zona de variação do lençol freático (Figura 6), além de pisoteamentos devido à criação sazonal de bubalinos. Ensaios de teor de umidade natural (w) nesta crosta (até 0,40 m de profundidade) revelaram solo muito seco, com $3,0 < w(\%) < 5,5$, porém devido ao período de estiagens. Este comportamento foi também observado por Côrtes e Adeodato (1982) quando do estudo dos



As Figuras 7 a 10 ilustram as sondagens SPT consideradas para a definição dos perfis típicos N° 4, N° 6, N° 13 e N° 14, no Eixo 01.



COBRAMSEG 2016

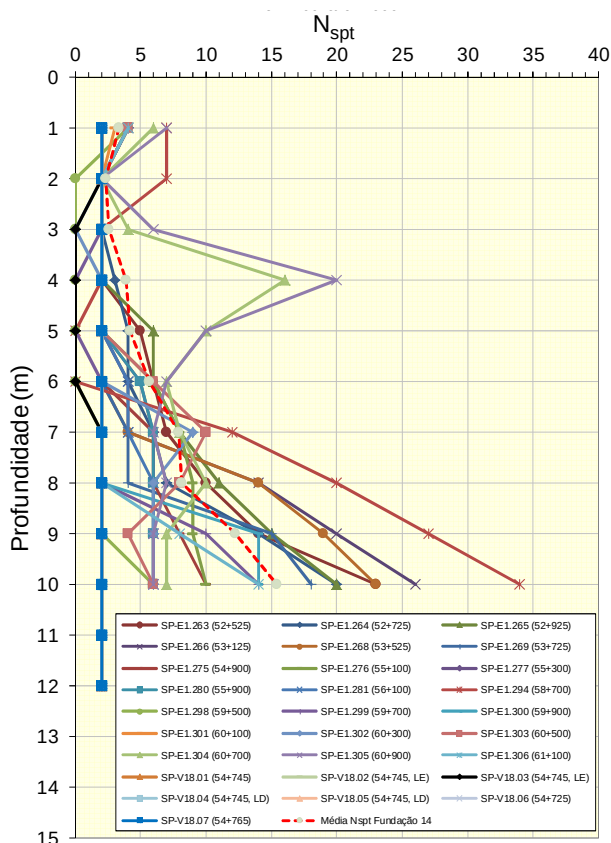


Figura 10. Perfil Típico N° 14 (7,9% da ext. do Eixo 01).

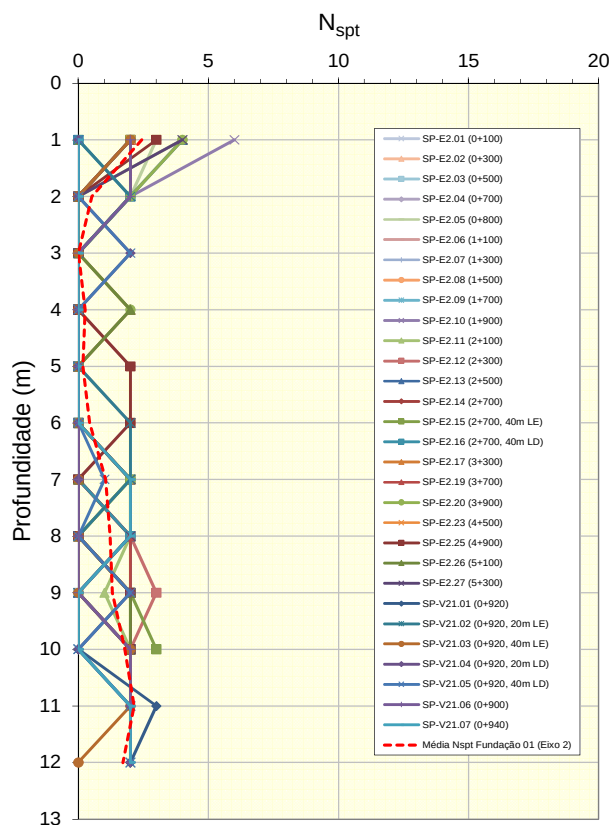


Figura 11. Perfil Típico N° 01 (82,1% da ext. Eixo 02).

As Figuras 11 e 12 sintetizam as perfurações utilizadas na estimativa dos perfis típicos N° 1 e N° 2, para o Eixo 02.

O efeito do provável sobreadensamento da crosta superficial (até prof. 2m) é nitidamente visível em todos os perfis analisados ($2 \leq N_{spt} \leq 12$). As variações das poropressões causadas pelas variações no nível d'água, o ressecamento por evaporação, o pisoteamento pelos bubalinos e a presença de vegetação sazonal, estão entre as principais causas deste sobreadensamento, confirmando-se as suposições de Ladd (1973). Também pode ter contribuído a incidência de alagamento periódico pelas marés, a concentração de sais solúveis e o elevada acidez dos solos superficiais. Estudos realizados por Lima et al (2007) em 38 amostras de solos da região revelaram que os solos superficiais apresentam-se extremamente ácidos ($ph < 4,3$, em 26,3% das amostras) a fortemente ácidos ($4,3 \leq ph \leq 5,3$, em cerca de 52,6% das amostras).

Abaixo da crosta ocorre camada de solo muito mole a mole, cor cinza escura, saturada, com espessuras variáveis (em geral 5 a 8 m).

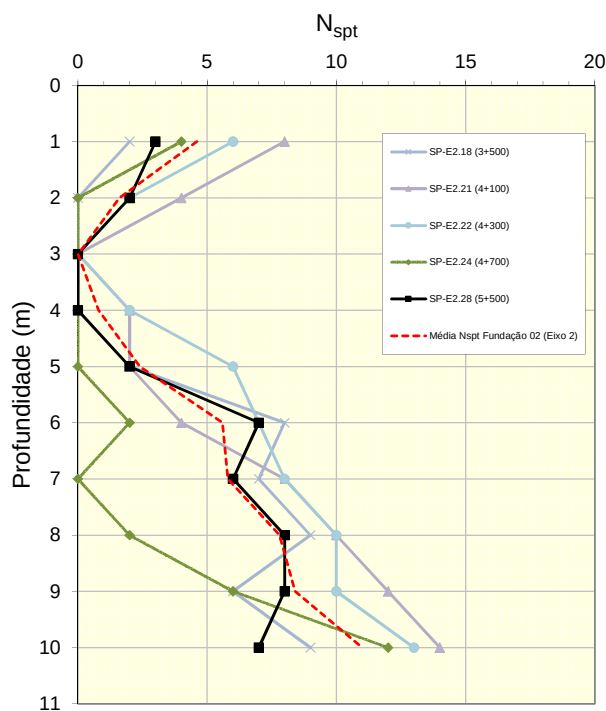


Figura 12. Perfil Típico N° 02 (13,7% da ext. Eixo 02).

3.2 Índices Físicos

A Tabela 1 apresenta os índices físicos na condição natural obtidos para as amostras

coletadas em profundidade, no amostrador-padrão da sondagem SPT (Figura 13).



Figura 13. Amostra coletada no Furo SP-E1.36, Est. 7+100, Eixo 01, Prof. 7,00 m.

3.3 Ensaios de Laboratório

Com as amostras coletadas nas sondagens a trado, foram executados ensaios correntes de laboratório, contemplando análises granulométricas e limites de plasticidade.

A Figura 14 apresenta os resultados das análises granulométricas evidenciando predomínio da textura argilo-siltosa dos solos moles, sendo que a fração de argila coloidal (diâmetro < 0,002 mm), situa-se entre 30 e 60%.

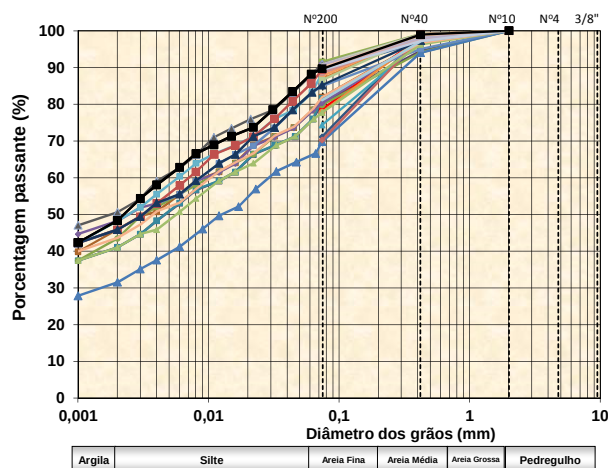


Figura 14. Análises Granulométricas (Solos Eixo 01 e 02, profundidade até 4,00m)

Chamou a atenção os valores obtidos para a Densidade Real dos Grãos (G), que oscilaram entre 2,46 e 2,48, abaixo dos valores usuais (esperava-se $G > 2,50$), o que pode estar associado à presença de matéria orgânica.

Tabela 1. Resultados dos Índices Físicos x Profundidade.

Furo	Prof. (m)	N _{spt}	w (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_D (kN/m ³)	e	n (%)
SP-E1.01	1 (SM)	5	22,48	19,35	15,80	0,56	35,72
Latitude:	2 (SM)	2	38,43	18,71	13,51	0,95	48,72
-3,265054	3 (SM)	5	44,35	17,77	12,31	1,10	52,30
Longitude:	4 (AF)	8	36,15	17,41	12,79	0,89	47,19
-44,902723	6 (AF)	50	21,59	21,62	17,78	0,53	34,80
Cota=5,99m	7 (AF)	54	23,65	19,23	15,55	0,58	36,89
SP-V1.05	7 (AF)	10	29,05	19,96	15,46	0,72	41,79
Latitude:	8 (AF)	11	38,38	18,81	13,59	0,95	48,69
-3,260358	9 (SM)	5	66,28	17,25	10,38	1,64	62,10
Longitude:	10 (SM)	2	54,21	17,46	11,32	1,34	57,26
-44,896774	12 (AF)	4	24,20	20,48	16,49	0,60	37,43
Cota=6,39m							
SP-V1.03	1 (SM)	1	36,42	17,88	13,10	0,90	47,38
Latitude:	2 (SM)	4	29,29	20,37	15,76	0,72	42,00
-3,259833	3 (AF)	9	29,15	20,27	15,69	0,72	41,88
Longitude:	4 (AF)	5	30,48	21,10	16,17	0,75	42,97
-44,897233	6 (SM)	1	72,88	16,32	9,44	1,80	64,31
Cota=5,81m	7 (SM)	1	71,48	15,28	8,91	1,77	63,86
SP-E1.34	6 (SM)	1	31,27	18,60	14,17	0,77	43,60
Latitude:	7 (AF)	1	25,36	15,07	12,02	0,63	38,53
-3,242919	8 (AF)	1	17,44	15,80	13,45	0,43	30,13
Longitude:	9 (SMO)	1	73,04	15,90	9,19	1,81	64,36
-44,850709	10 (SMO)	0	60,60	16,11	10,03	1,50	59,97
Cota=5,76m	11 (SMO)	1	58,52	16,94	10,69	1,45	59,13
SP-E1.35(1)	1 (SM)	5	31,74	19,44	14,75	0,78	43,97
SP-E1.36	2 (SM)	4	28,68	20,16	15,67	0,71	41,49
Latitude:	6 (SMO)	1	45,02	16,11	11,11	1,11	52,67
-3,241226	7 (AF)	2	23,40	22,24	18,02	0,58	36,65
Longitude:	8 (AF)	0	24,23	22,45	18,07	0,60	37,46
-44,847558	9 (AF)	2	21,45	21,72	17,89	0,53	34,66
Cota=5,23m							
SP-E1.84	1 (AF)	3	13,43	21,03	18,54	0,33	24,92
Latitude:	2 (SMO)	1	30,61	18,29	14,01	0,76	43,08
-3,173704	5 (SMO)	0	42,70	17,15	12,02	1,06	51,35
Longitude:	6 (SMO)	2	30,22	18,92	14,53	0,75	42,76
-44,822232							
Cota=6,26m							
SP-E1.185	1 (SM)	3	38,61	18,71	13,50	0,95	48,84
Latitude:	2 (SM)	3	46,62	17,36	11,84	1,15	53,54
-3,069696	3 (SM)	2	49,93	16,42	10,95	1,23	55,25
Longitude:	4 (SM)	2	52,05	16,42	10,80	1,29	56,27
-44,718035	6 (AF)	8	33,94	18,40	13,74	0,84	45,62
Cota=4,70m	7 (AF)	11	29,32	15,69	12,14	0,72	42,03
	8 (AF)	22	31,24	19,75	15,05	0,77	43,57
	9 (AF)	18	30,59	19,02	14,57	0,76	43,06
	10 (AF)	32	59,02	20,30	12,76	1,46	59,33
SP-E1.272(2)	1 (SM)	1	67,30	14,76	8,82	1,66	62,46
SP-E1.274	1 (SM)	1	47,21	16,21	11,01	1,17	53,86
Latitude:	2 (SM)	0	61,60	13,62	8,43	1,52	60,36
-2,945791	4 (SM)	0	59,47	14,34	8,99	1,47	59,52
Longitude:	6 (SM)	1	71,00	14,03	8,21	1,76	63,71
-44,72784	7 (SM)	1	69,93	14,14	8,32	1,73	63,35
Cota=3,79m	8 (SM)	2	79,13	14,55	8,12	1,96	66,17
	10 (SM)	2	76,47	14,97	8,48	1,89	65,40
SP-E1.287(3)	1 (SM)	2	36,89	17,05	12,45	0,91	47,70
	2 (SM)	1	56,41	16,73	10,70	1,39	58,24
SP-E2.23	2 (SMO)	0	79,22	14,45	8,06	1,96	66,20
Latitude:	3 (SMO)	0	59,51	16,21	10,16	1,47	59,53
-2,785851	4 (SMO)	0	72,73	15,80	9,15	1,80	64,26
Longitude:	5 (SMO)	0	82,87	14,66	8,01	2,05	67,20
-44,662477	6 (SMO)	0	80,01	16,11	8,95	1,98	66,42
Cota=3,94m							

Notas:

- (1) Furo SP-E1.35: Latitude = -3,242231°; Longitude = -44,849052°; Cota = +5,57 m
- (2) Furo SP-E1.272: Latitude = -2,947411°; Longitude = -44,730008°; Cota = +3,95 m
- (3) Furo SP-E1.287: Latitude = -2,930108°; Longitude = -44,709361°; Cota = +4,22 m

SM = Solo Mole (Argila); AF = Areia Fina siltosa; SMO = Solo Mole Orgânico (Argila)

O Gráfico de Plasticidade (Figura 15) mostra que em geral a plasticidade é média, para solos

amostrados até prof. 4,00 m, com $31,1 \leq LL(\%) \leq 41,3$ e $6,3 \leq IP(\%) \leq 12,3$, sendo classificados como ML e/ou OL (SUCS). Supõe-se (por avaliação tátil-visual) que as argilas moles mais profundas devam apresentar maior plasticidade e compressibilidade (MH e OH), tal como observado no Campo de Perizes-MA (Macedo e Rodrigues, 2014).

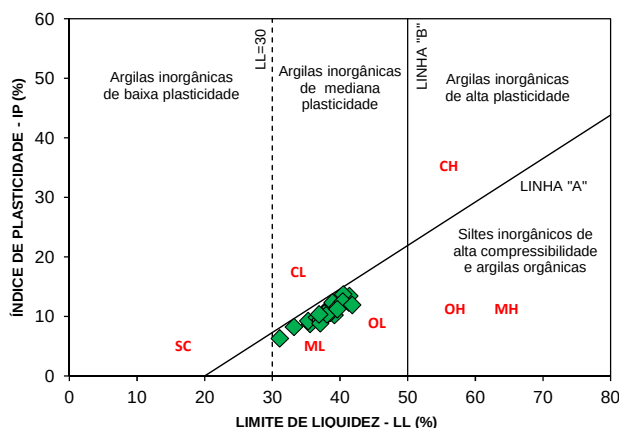


Figura 15. Gráfico de Plasticidade (Solos Eixo 01 e 02, profundidade até 4,00m)

4 ANÁLISES E INTERPRETAÇÕES

Os perfis de sondagens SPT evidenciaram solos típicos de depósitos sedimentares de planície, com predominância de solos argilosos moles a muito moles saturados, orgânicos, com intercalações eventuais de camadas arenosas ou areno-argilosas. As espessuras das camadas de solo mole são variáveis, com segmentos de camadas rasas e segmentos de camadas espessas (superiores a 8,00m), sendo que na travessia de alguns igarapés foram identificados solos muito moles com profundidades superiores a 20 m.

Os estudos geológico-geotécnicos indicaram péssimas qualidades geotécnicas dos solos das fundações dos Eixos 01 e 02 (que atravessam a Baixada Maranhense), que podem ser traduzidas por baixa resistência ao cisalhamento e elevada compressibilidade dos solos na sua condição natural, o que deverá ser investigado complementarmente.

Constatou-se que a crosta se apresenta com indícios de sobreadensamento (prof. até 2 m) provavelmente originário das condições intempéricas (alternância de alagamentos com períodos de estiagens) e da influência de marés

salinas da Baía de São Marcos (presença de sais e elevada acidez). É muito provável a ocorrência de solos com resistência não-drenada inferior a 12 kPa, “extremamente moles”, para $N_{spt} \leq 1$, conforme sugeriu Sandroni (2010), notadamente para solos compreendidos entre 3 e 8 m de profundidade (Figuras 8, 9 e 11).

O peso específico natural dos solos variou entre 13,6 e 22 kN/m³ (Tabela 1), sendo que as densidades mais baixas correspondem a solos tipicamente argilosos moles e orgânicos. Para estes solos observou-se que o peso específico aparente seco (γ_d) resultou abaixo de 10 kN/m³ (Figura 16), sendo tipicamente ilustrado pelo perfil do furo SP-E1.274. Tais resultados são coerentes com a literatura geotécnica para solos similares (argilas moles) de outros depósitos sedimentares brasileiros (Martins et al, 2006; Jannuzzi, 2009), assim como àqueles encontrados no Campo de Perizes-MA (Côrtes e Adeodato, 1982).

O teor de umidade natural variou entre 13,4 e 82,9% (Figura 17), sendo que os valores mais elevados se referem às argilas moles.

Quanto ao índice de vazios observou-se $0,33 \leq e \leq 2,05$ (Figura 18), sendo que os valores mais elevados são indicativos de solos muito compressíveis, enquanto os valores mais baixos se referem a solos da crosta endurecida.

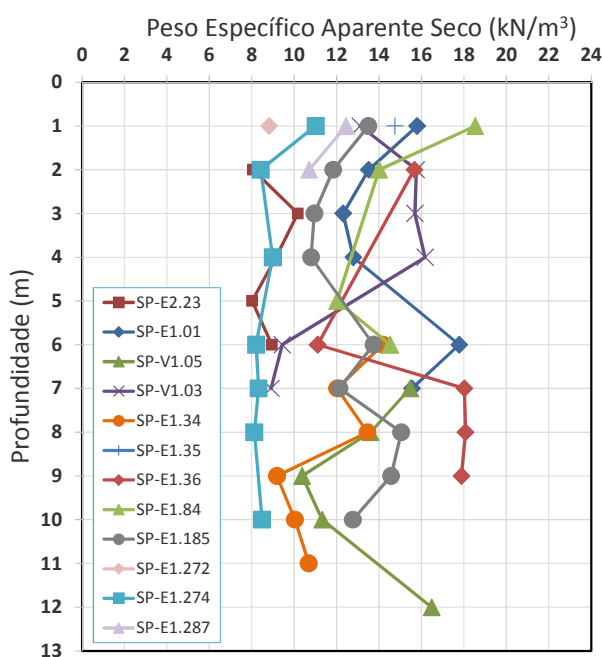


Figura 16. Variação do γ_d x Profundidade.

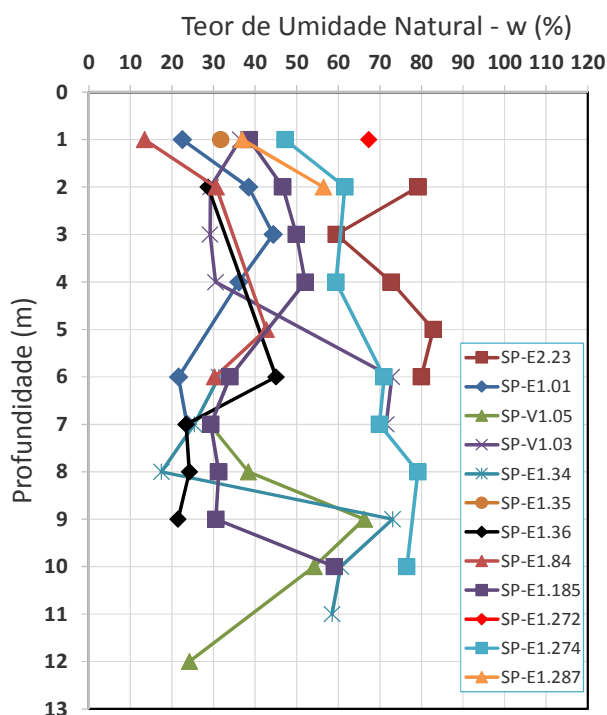


Figura 17. Variação do Teor de Umidade x Profundidade – Época de Estiagens (Solos Eixo 01 e 02)

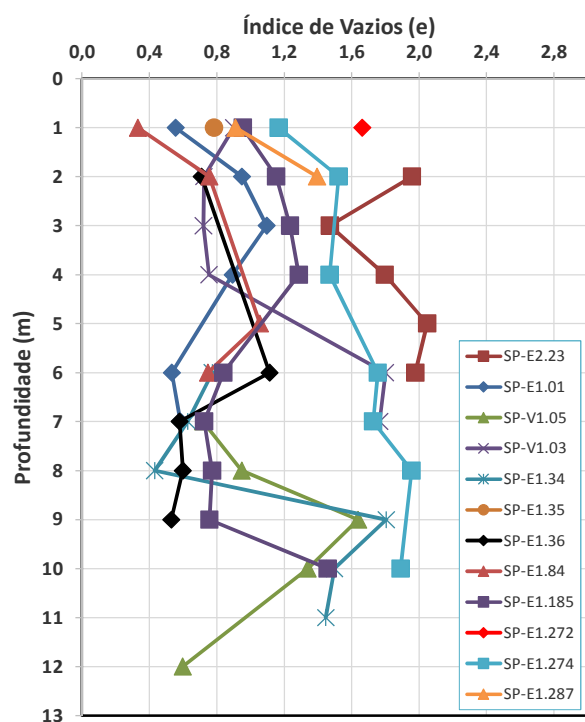


Figura 18. Variação do Índice de Vazios x Profundidade.

AGRADECIMENTOS

O Autor agradece a CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento dos Vales dos Rios São Francisco e do Parnaíba, representada pela Eng^a Cibele Ribeiro e pelo Geólogo João Tomio

Shimabukuro (Brasília-DF), pela coordenação e compreensão da importância da execução das investigações geotécnicas.

REFERÊNCIAS

- Consórcio Engeplus-Proenge (2015), Anteprojeto de Engenharia do Sistema de Diques da Baixada Maranhense, Relatório RP02 – Serviços de Campo, Tomos I, II e III, objeto do contrato CT 0.153.00/2013, elaborado para a CODEVASF/MI – Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba, Ministério da Integração Nacional, Brasília-DF, 1.399 p.
- Côrtes, H.V.M e Adeodato, H.V.F. (1982), Considerações a Respeito do Recalque Admissível em Aterros Ferroviários sobre Solos Compressíveis, *VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*, Olinda-Recife, p. 139-149.
- Jannuzzi, G.M.F. (2009), *Caracterização do Depósito de Solo Mole de Sarapuí II através de Ensaio de Campo*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 195 p.
- Ladd, C.C. (1973), Estimating Settlements of Structures Supported on Cohesive Soils. *Special Summer Program 1.34S "Soft Ground Construction"*.
- Lima, G.P., Valladares, G.S. e Quartaroli, C.F. (2007), Caracterização Química e Granulométrica de Solos da Baixada Maranhense, *XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, CD-ROM. Gramado-RS. 5 p.
- Macedo, E. O. e Rodrigues, J. (2014), Análise da Eficiência do Reforço de Solo Mole, com a Técnica CPR, para duplicações da BR-135 e Ferrovia Transnordestina, em Campo de Perizes-MA, *XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Goiânia-GO, 7 p.
- Martins, I.S.M, Santa Maria, P.E.L, e Santa Maria, F. (2006), Investigações de Campo e de Laboratório na Argila de Sarapuí, *Solos e Rochas*, Vol. 29, N° 01, pp. 121-126.
- NBR 6459:1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez.
- NBR 6484:2001 – Solo – Sondagens de Simples Reconhecimentos com SPT.
- NBR 6508:1984 – Grãos de Solos que passam na Peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica.
- NBR 7180:1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.
- NBR 7181:1988 – Solo – Análise Granulométrica.
- NBR 16097:2012 – Solo – Determinação do Teor de Umidade.
- Sandroni, S.S. (2010), Sobre a Prática da Engenharia Geotécnica com Dois Solos Difíceis: os Extremamente Moles e os Expansivos. *XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Gramado-RS. pp. 97-187.