

Estudos Geológico-Geotécnicos e Soluções de Engenharia para Aterros Sobre Solos Moles – Nova Tamoios Contornos – Caraguatatuba

Ivan Steinmeyer

Engenheiro Civil, STEINSOLOS Engenharia, São Paulo, Brasil, ivan02@uol.com.br

Marcio Angelieri Cunha

Geólogo, GEOMAC Geologia Geotecnia e Meio Ambiente, São Paulo, Brasil, geomacunha@uol.com.br

Marcos Saito de Paula

Geólogo, JS Geologia Aplicada, São Paulo, Brasil, msaito@jsgeo.com.br

Bruno Paulo Goulart

Engenheiro Civil, Arcadis, São Paulo, Brasil, bruno.goulart@arcadis.com

Faiçal Massad

Prof. Titular, EPUSP, São Paulo, Brasil, faical.massad@usp.br

RESUMO: Este trabalho apresenta os resultados dos estudos geológico-geotécnicos e as soluções de engenharia adotadas no projeto da Rodovia dos Contornos da Nova Tamoios, de Caraguatatuba até São Sebastião, no Litoral Norte do Estado de São Paulo, com destaque para a transposição de regiões de solo mole ao longo de várias planícies aluvionares. As obras foram iniciadas em 2014, totalizando cerca de 36 km de extensão, incluindo túneis, viadutos, cortes e aterros. Os aterros estenderam-se por cerca de 16 km e requereram investigações de superfície e subsuperfície realizadas no Lote 2 da referida rodovia, permitindo encontrar diversas condições de ocorrência de solo mole, onde foram adotadas diferentes soluções de engenharia, que são objeto do presente trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Aterros sobre solos moles, Obras de terra, Aterros, Rodovias, Caraguatatuba

ABSTRACT: This paper presents the results of the geological-geotechnical studies and the engineering solutions adopted in the design of the Nova Tamoios Contornos Highway from Caraguatatuba to São Sebastião, in the North Coast of the State of São Paulo, Brazil, with emphasis on the transposition of soft soils along several floodplains. The construction started in 2014, totaling about 36 km in length, including tunnels, bridges, cuts and embankments. The embankments extended for about 16 km and required surface and subsurface investigations, allowing to find several conditions of soft soil occurrences, where different engineering solutions were adopted, which are the object of the present paper.

KEYWORDS: Soft soil embankments, Earthworks, Embankments, Highways, Caraguatatuba

1 Introdução

As obras para a implantação da Rodovia dos Contornos da Nova Tamoios, de Caraguatatuba e São Sebastião, no Litoral Norte do Estado de São Paulo foram iniciadas em 2014, totalizando cerca de 36 km de extensão, incluindo, túneis, viadutos, cortes e aterros. Os projetos desenvolvidos foram precedidos por detalhados estudos geológico-geotécnicos ao longo de todo o traçado e nas áreas do entorno dessa rodovia, destacando-se aqueles realizados para a transposição de regiões de solo mole ao longo de várias planícies aluvionares, entre elas a Planície Aluvionar de Caraguatatuba de maior extensão onde as obras de aterro estenderam-se por cerca de 16 km. Nessa Planície, as investigações de superfície e subsuperfície realizadas

no Lote 2 da referida rodovia, permitiram encontrar diferentes condições de ocorrência de solo mole, onde foram adotadas diferentes soluções de engenharia, que são objeto do presente trabalho.

2 Objetivos

Neste trabalho pretendeu-se abordar os diversos estudos geológicos e geotécnicos (mapeamentos de superfície, sondagens à percussão, ensaios de campo e laboratórios) e as respectivas soluções para os aterros implantados na Planície de Caraguatatuba tendo em conta as diversas formas de ocorrência do solo mole assim como sua grande heterogeneidade tanto em superfície como em subsuperfície.

3 Metodologia

A metodologia de trabalho para os estudos do solo mole no trecho de travessia da Planície de Caraguatatuba consistiu na detalhada caracterização de superfície através de mapeamento das áreas identificáveis visualmente e investigações do subsolo por sondagens e ensaios de campo e de laboratório. Os ensaios de campo foram definidos a partir do perfil geológico-geotécnico, em 12 locais (denominados ilhas de ensaios), representando os diversos tipos de ocorrência de solo mole, sendo executados ensaios de vane test, CPTU e retiradas de amostras shelly para ensaios de laboratório (umidade, densidade real dos grãos, granulometria por peneiramento e sedimentação, limites de Atterberg e adensamento).

Foram então definidos cenários de ocorrência de solo mole, em função das características geológico-geotécnicas, utilizando-se como critérios básicos para essa definição a classificação genética, bem como o mapeamento de campo e os valores de N_{SPT} das sondagens a percussão. A partir da análise dos dados foi apresentada uma proposta de parâmetros que subsidiaram a definição dos projetos tipo para os diversos cenários definidos.

4 Caracterização Geológico-Geotécnica dos sedimentos da Planície de Caraguatatuba

A Planície Aluvionar de Caraguatatuba está encaixada no sopé da Serra do Mar, limitadas pelas rochas do Embasamento Cristalino (migmatitos e granitoides, principalmente) que compõem essas encostas. Essa planície destaca-se em todo o Litoral Norte pela sua grande dimensão em relação a todas as demais planícies de menor dimensão, mais comum nessa região. Possui cerca de 12 km de comprimento e 7 km de largura máxima. Nessa planície encontram-se depósitos Pleistocênicos (sedimentados há mais de 100 mil anos) e Holocênicos (de 8 mil anos até os nossos dias), descritos a seguir, conforme Suguio e Martin (1978). A Figura 1 ilustra a geologia da planície e seus entornos.

- Os depósitos Pleistocênicos, associados à transgressão Cananéia, formam terraços de areias alçados 7 a 8 m de altura, muito dissecados pela erosão; são encontrados ao norte e mesmo no centro e sul, sobrejacentes a argilas e areias transicionais (em verde na Figura 1);
- Os depósitos Holocênicos (em amarelo na Figura 1), estão associados à transgressão Santos, com duas gerações de cordões de areia, retrabalhados por ação eólica e fluvial. No costado da 1ª geração de cordões, situado mais para o interior da planície, encontram-se os sedimentos argilosos flúvio-lagunares (SFL) mais antigos (8.000 a 4.400 anos BP - *Before Present*); em frente aos cordões da 2ª geração, mais recentes (2.700 anos BP), estão as areias das praias atuais. Sob esses cordões arenosos, e por vezes a eles associados, encontram-se sedimentos flúvio-lagunares (areias, areias argilosas e argilas orgânicas).
- Depósitos aluvionares e continentais são encontrados recobrimo os sedimentos holocênicos e, por vezes, enterrados sob os SFL, reflexos de eventos pretéritos associados a redes hidrográficas antigas e a corridas de massas. Corridas de massas, como as de 1967, recobriram os sedimentos marinhos depositados ao longo de milênios, sem desestruturá-los. Prova disso são as variações praticamente lineares da resistência de ponta corrigida (q_t) de muitos dos CPTUs identificados nos ensaios para as obras do Contorno.



Figura 1: Mapa geológico da região de Caraguatatuba (Modificado de Suguio e Martin, 1978) e traçado dos Lotes 1 e 2 dos Contornos de Caraguatatuba e São Sebastião. A – Planície aluvionar de Caraguatatuba. B – Amostra de solo mole de um dos locais de ensaios (Ilha 9). Mapa em Datum SIRGAS 2000, UTM Zona 23S.

Os sedimentos flúvio-lagunares (SFL), que ocorrem sob os cordões de areia, foram submetidos à ação errática de dunas, cujo peso próprio justifica tanto alguns N_{SPTs} relativamente mais elevados de camadas de argila mole, com valores de 2 a 4 golpes, quanto o seu sobre-adensamento. Ademais, por se tratar de uma planície, os rios das redes hidrográficas são meandrantés, com mudanças nos cursos dos seus leitos ao longo do tempo, formando depósitos de solos moles e areias fofas com variações laterais abruptas e ocorrências localizadas. Alguns desses rios correm paralelamente aos cordões de areia; outros cruzam esses cordões, conforme podem ser identificados na Figura 1. Esses aspectos, somados aos diferentes processos deposicionais, justificam a extrema heterogeneidade do subsolo ao longo do traçado estudado.

O perfil geológico ao longo do traçado do Lote 2, elaborado com base nas sondagens, evidência os diferentes processos deposicionais mencionados acima, onde se constata a grande heterogeneidade do subsolo no local, atribuída à sua formação geológica. Essa heterogeneidade pode ser caracterizada, segundo o estaqueamento original da rodovia, definido na Figura 1, da seguinte forma:

- Entre as estacas 2.000 (próximo ao Rio Santo Antônio) e 2.200 (Morro dos Ingleses), o solo mole aflora na superfície em depressões úmidas (estaca 2.050) ou dela se aproxima, em geral com 2 a 3 m de cobertura de sedimentos continentais e areia (estacas 2.070, 2.134 e 2.150 a 2.200);
- Entre a estaca 2.200 (Morro dos Ingleses) e a estaca 2.290 (trevo projetado), a cobertura com sedimentos continentais e areias é superior a 6m, que vai diminuindo até a estaca 2370; e
- Entre as estacas 2.370 e 2.440 o solo mole volta a aflorar; daí em diante, até a estaca 2.750 ocorrem alternâncias de trechos com espessas coberturas de areias pleistocênicas (ver a Figura 1), ou sedimentos continentais, e afloramentos de solos moles de depressões úmidas.

5 Classificação das argilas moles e definição de cenários geológico-geotécnicos

Do ponto de vista genético, isto é, de sua formação, as argilas marinhas da Planície Costeira de Caraguatatuba podem ser classificadas da seguinte forma (Suguió, 1978 e Massad, 2009):

- Mangue, de deposição recente, com N_{SPTs} nulos, em depressões úmidas atuais (Relatório IPT, 1982).
- Argilas de SFL (Sedimentos Flúvio-Lagunares), Holocênicas, com N_{SPTs} entre 0 e 2 golpes; e
- Argilas Transicionais (ATs), depositadas em ambiente misto continental-marinho, durante o Pleistoceno, são solos muito sobre-adensados, com $N_{SPTs} \geq 5$.

Foram definidos cenários de ocorrência de solo mole, em função das características geológico-geotécnicas (Tabela 1). Foram utilizados como critérios básicos para essa definição a classificação genética, bem como o mapeamento de campo e os valores de N_{SPT} das sondagens a percussão, que se constituem na informação mais abundante ao longo do traçado dos Contornos. A última coluna dessa tabela apresenta as descrições mais usadas nos perfis de sondagens para as argilas de cada cenário.

Tabela 1: Definição dos cenários de solos moles

Cenário	Tipo de solo	N_{SPT}	Descrição mais comum nas sondagens
0	Mangue (*)	0 (zero)	Argila orgânica, em geral preta, com detritos vegetais. Argila marinha, arenosa, cinza, com conchas.
1	Argila de SFL	0 a 1	Argila orgânica, preta, com detritos vegetais. Argila marinha, siltosa, pouco arenosa, micácea, cinza escura. Argila plástica, pouco siltosa ou pouco argilosa ou pouco arenosa, cinza escura ou cinza ou marrom escura, por vezes com conchas.
2	Argila de SFL	1 a 2	Argila orgânica, preta, com detritos vegetais. Argila plástica, pouco siltosa ou argilosa, cinza escura, por vezes com conchas.
10	AT – Argila Transicional	5 a 9	Argila plástica, pouco arenosa ou pouco siltosa, cinza escura ou cinza.

Nota: (*) O termo Mangue tem a conotação Geotécnica e não se refere a tipo de vegetação.

O subsolo é extremamente heterogêneo, constituído de argilas siltsosas com areia fina, entremeadas por camadas de areias, com teor de argila >42%, umidade natural (h) de 47 a 676%; densidade natural (γ_n) 11,3 e 17,1 kN/m³; $LL > 50\%$ e IP médio de 55%. Valores de C_c foram inferidos através das medidas das umidades das amostras. Os Vane Tests (VTs) e os CPTUs confirmaram essa extrema heterogeneidade, quer nos valores da resistência não drenada (s_u), das pressões de pré-adensamento (σ'_a) e dos coeficientes de adensamento (C_v). Quando se passa do Cenário 0 ao 10 (Tabela 2), os valores de RSAs (OCRs) evoluíram, crescendo da zona 1 até a 6 no diagrama $Q_f \times B_q$ de Robertson et al. (1986).

Com base nos resultados da investigação foram propostos para o projeto os parâmetros da Tabela 2, com a recomendação de um acompanhamento por instrumentação na fase executiva, para a sua validação e eventual adaptação às condições reais da obra.

Tabela 2: Definição dos cenários de solos moles

PARÂMETRO	CENÁRIO 0	CENÁRIO 1.1	CENÁRIO 1.2	CENÁRIO 2	CENÁRIO 10
Tipo de Solo	Mangue	Argila de SFL Aflorante	Argila de SFL Profunda	Argila de SFL	AT
N_{SPT}	0	0 a 1	0 a 1	1 a 2	7 a 9
γ_n (kN/m ³)	13,4	14,0	14,3	15,0	15,5
s_u (kPa) (*)	2+1,33.z	6+1,20.z	15+1,20.z	21+1,43.z	50+2.z
μ (Correção de Bjerrum)	0,70	0,75	0,75	0,75	0,75
σ'_a	2+ γ' .z	20+ γ' .z	25+ γ' .z	50+ γ' .z	170+ γ' .z
$C_c/(1+e_o)$ (**)	0,40	0,30	0,30	0,30	0,40
C_r/C_c (**)	14%	14%	14%	14%	12%
$C_v(na)$ (cm ² /s)	8.10 ⁻⁴	2.10 ⁻³	2.10 ⁻³	7.10 ⁻³	1,5.10 ⁻³
$C_{\alpha\epsilon}$ (%) (***)	2,5%	2%	2%	1,5%	1%

Notas :(*) Os s_u foram obtidos através dos VTs e dos CPTUs, sem a correção de Bjerrum (μ).

(**) Valores obtidos com base nos ensaios de caracterização e de adensamento.

(***) Fórmula de Mesri-Godlewski (1977): $C_{\alpha\epsilon} \cong 4$ a 6% de $C_c/(1+e_o)$

6 Diretrizes adotadas para o projeto dos aterros na Planície de Caraguatatuba

Os estudos de campo e laboratório permitiram estabelecer um modelo geológico geotécnico que resultaram em diferentes cenários, conforme mostrado anteriormente, sobre os quais foram definidas as soluções para implantação dos aterros.

Essas soluções consideraram para cada cenário os respectivos parâmetros geométricos e geotécnicos: a altura do aterro a ser implantado, a espessura da camada de solo mole, a presença e espessura de camada de cobertura do solo mole e a presença em superfície de solo arenoso ou aterro existente (parte do projeto foi implantado sobre o antigo traçado da BR 101).

Assim, foram adotados os seguintes tratamentos para as fundações dos aterros:

- Conviver com recalques de até 5 cm de aterros com as presenças de estruturas rígidas, como Obras de Artes Especiais (OAE) e Encontros Leves Estruturados (ELE), ou junto à Aterros Estaqueados. Para os demais trechos o recalque aceitável foi de 25 cm. Para alguns trechos foram implantadas geogrelhas na base do aterro para atender ao fator de segurança de estabilidade global mínimo de 1,3 para fase de obras e de 1,5 para a fase de operações. O aumento do fator de segurança entre as fases deveu-se ao ganho de

resistência das camadas de solo mole devido aos recalques dissipados no decorrer do tempo desde a implantação do aterro (Figura 2 – Seção Típica 1).

- b) Remoção parcial do solo mole na espessura de até 4,00 m, quando em superfície, e conviver com recalques de até 5 cm, ou 25 cm (Figura 3 – Seção Típica 2).;
- c) Remoção total do solo mole até 4,00 m, excepcionalmente até 5,00 m de profundidade (Figura 4 – Seção Típica 3);
- d) Aterro de sobrecarga, por vezes com o auxílio de drenos verticais para redução do tempo de permanência da sobrecarga, e geogrelhas para se garantir os fatores de segurança de estabilidade globais aceitáveis (Figura 5 – Seção Típica 4);
- e) Para solo mole com espessura superior a 6,00 m, aterro estaqueado que consiste em estrutura mista que combina uma solução de terraplenagem convencional (a execução do aterro propriamente dito) com uma solução típica de fundação profunda (estacas projetadas para transferir toda a carga do aterro para camadas mais resistentes do terreno) (Figura 6 – Seção Típica 5).
- f) Encontro Leve Estruturado (ELE) que pode ser considerado como uma obra de arte especial (OAE) de porte inferior, com menores vãos e elementos estruturais, sendo geralmente utilizado para greides baixos a intermediários, onde seu principal atrativo é o fato de apresentar custo consideravelmente menor que uma OAE convencional. Essa solução é aplicada junto aos encontros das OAEs.

As Figuras 2 a 6 ilustram os vários tratamentos das fundações, através de seções típicas.

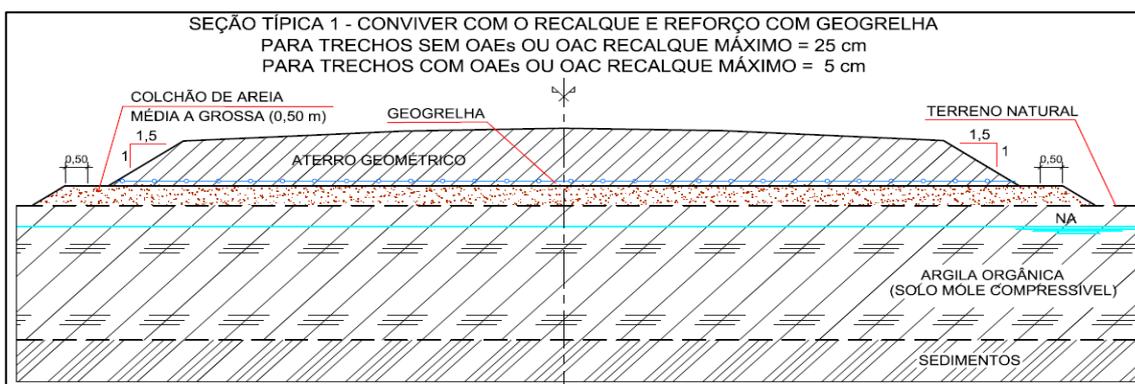


Figura 2: Seção Típica 1

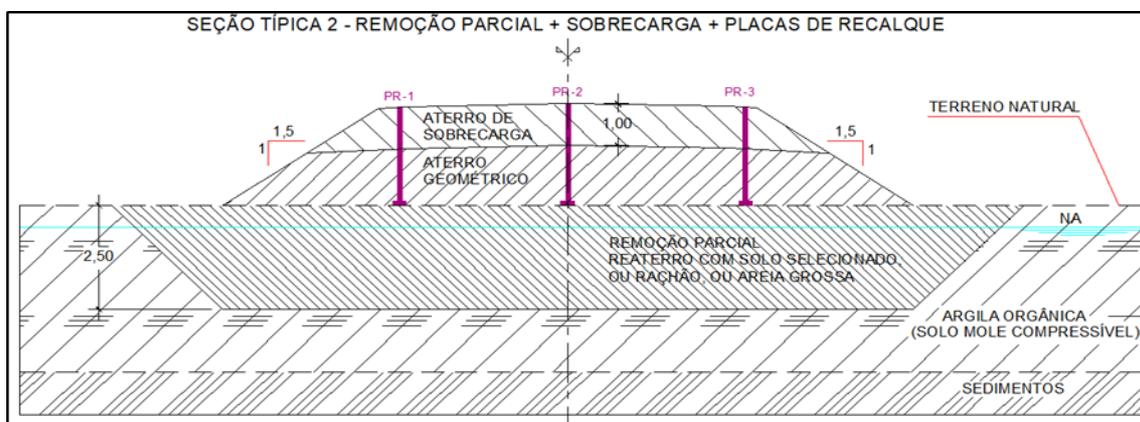


Figura 3: Seção Típica 2

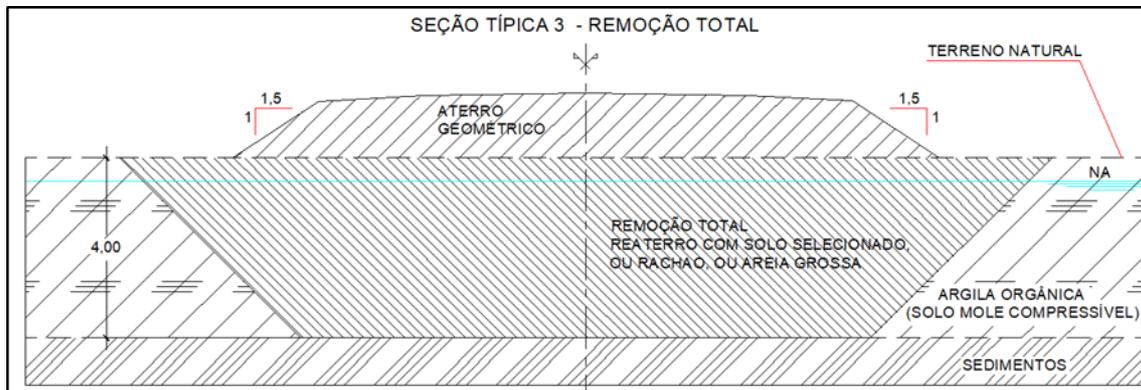


Figura 4: Seção Típica 3

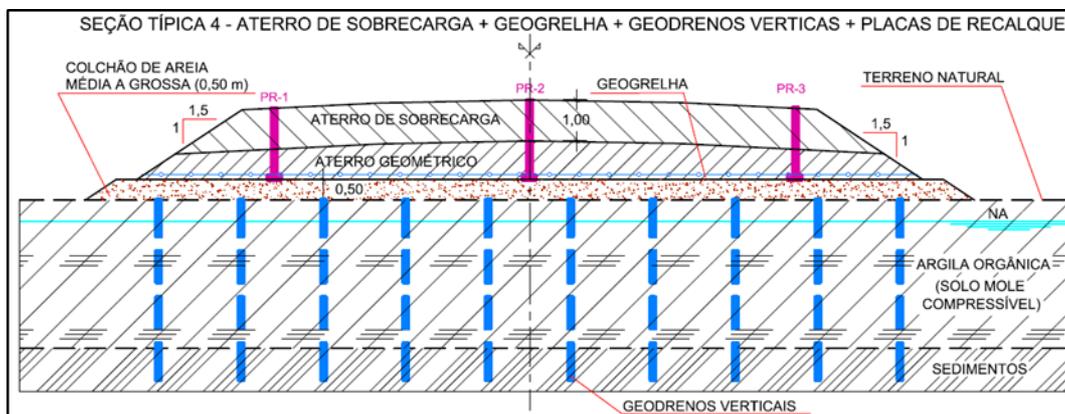


Figura 5: Seção Típica 4

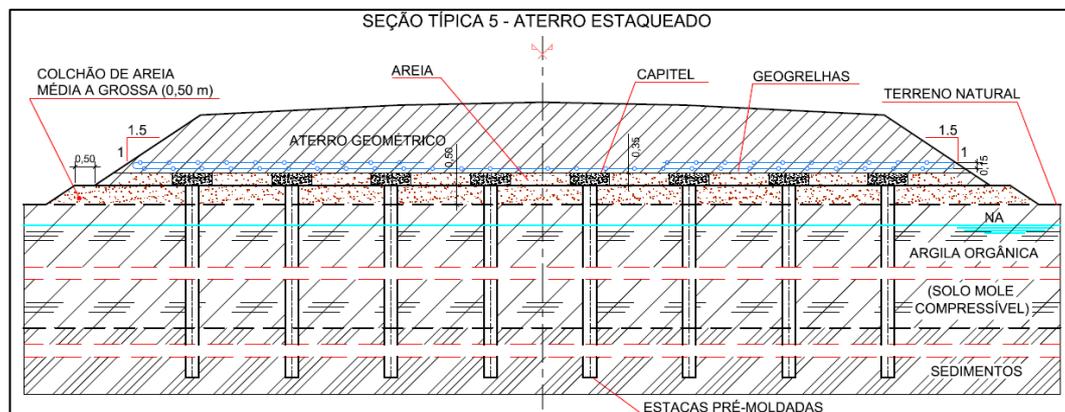


Figura 6: Seção Típica 5

7 Conclusões

Os estudos realizados para o projeto geotécnico dos aterros, nas transposições de áreas de solo mole ao longo do traçado, permitiram diversificar as soluções, fundamentadas nos parâmetros obtidos nas diversas ilhas de ensaios, altura do aterro, da espessura da camada de solo mole, da presença e espessura de camada de cobertura do solo mole, em solo arenoso ou aterro existente. Foram adotadas diversas soluções, desde conviver com recalques de até 25 cm dos aterros, uso de geogrelhas, drenos verticais para acelerar os recalques, estaqueamento de aterros até a remoção parcial ou total dos solos moles. Recalques menores (5cm) foram admitidos apenas em aterros próximos aos encontros das Obras de Artes Especiais (OAE) e dos Encontros Leves Estruturados (ELE).

LISTA DE SÍMBOLOS

B_q	: Coeficiente de Poropressão do CPTU: $B_q = (u_2 - u_o)/(q_t - \sigma_{vo})$
C_c	: Índice de Compressão
C_r	: Índice de Recompressão
$C_v; C_h$: Coeficientes de Adensamento Primário Vertical e Horizontal
CPTU	: CPTU: Cone Penetration Test, com Medida da Pressão Neutra
h	: Umidade Natural
(na)	: Normalmente Adensado
IP	: Índice de Plasticidade
LL	: Limite de Liquidez
q_t	: Resistência de Ponta do Cone, Corrigida
Q_t	: Resistência de ponta do CPTU adimensionalizada: $Q_t = (q_t - \sigma_{vo})/\sigma'_{vo}$
RSA	: Relação de Sobre-adensamento (OCR)
S	: Grau de Saturação
u	: Pressão Neutra
u_o	: Pressão Neutra Hidrostática
u_2	: Pressão Neutra Medida na Base do Piezocone
VT	: Vane Test ou Ensaio da Palheta
μ	: Fator de correção de Bjerrum
γ_n	: Peso Específico Natural
γ'	: Peso Específico Efetivo ou Submerso
σ'_a	: Pressão de Pré-adensamento
σ_{vo}	: Tensão Vertical Total Inicial

AGRADECIMENTOS

À DERSA (Desenvolvimento Rodoviário S/A) pela autorização da utilização e publicação dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Massad, F. (2009). Solos Marinhos da Baixada Santista – Características e Propriedades Geotécnicas. São Paulo. Editora de Textos, S. Paulo, 247 páginas.
- Mesri, G.; Godlewski, P.M. (1977) Time and Stress Compressibility Interrelationship. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, v.103, n.GT5, p.417-30, May.1977.
- Relatório IPT (1982): “Gênese, Distribuição e Estratigrafia dos Depósitos Cenozóicos no Estado de São Paulo”. (Relatório no 16.869).
- Robertson, P. K.; Campanella, R. G.; Gillespie, D. E Greig, J. (1986) Use of Piezometer cone Data. *Specialty Conf. Use In Situ Tests Geotech. Engng.* New York, ASCE.
- Suguio, K. e Martin, L. (1978): “Formações Quaternárias Marinhas do Litoral Paulista e Sul Fluminense”. Publicação Especial no 1. In: *International. Symposium on Coastal Evolution in the Quaternary*, Sept., 11-18, São Paulo.