

SOLOS COMPRESSÍVEIS DA BAIXA DE ST.º ANDRÉ (ÁREA DE SINES) GEOLOGIA E CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA*

Soft soils from S. André Basin (Sines Area) Geology and Geomechanic Characterization

por

J. A. HORTA DA SILVA**

RESUMO — A Área de Sines tem formações aluvionares quaternárias que compreendem a existência de solos compressíveis argilosos e turfosos, muito moles e moles. A zona da lagoa de Santo André constitui um exemplo da ocorrência deste tipo de terreno.

Neste artigo descrevem-se as características geológicas e geotécnicas das aluviões da Baixa de Santo André e discute-se a influência dos factores geológicos no comportamento geomecânico dos solos estudados, bem como a confiança nos métodos de ensaio.

São utilizados dados de sondagens geológicas, de ensaios «in situ» (SPT, penetrómetro holandês e de pás rotativas) e de ensaios laboratoriais (granulometria, limites de Atterberg, difracção de raios-X, compressibilidade em edómetro e corte triaxial.

SYNOPSIS — In the Sines Area there are quaternary alluvium deposits, which include the existence of very soft and soft compressive clayey and peat soils. The S. André lagoon site is an example of the occurrence of this type of terrain.

In this paper the geologic and geotechnical characteristics of the alluvium deposits from S. André are described and a discussion on the influence of the geological factors upon their engineering behaviour and on the reliability of the testing methods is provided.

The data used comprises results of geological drilling, «in situ» testing (SPT, dutch cone and vane test) and laboratory testing (particle size analysis, Atterberg limites, X-ray diffraction, oedometer and triaxial shear strength tests)

1. — INTRODUÇÃO

1.1 — A Área de Sines é cortada por várias linhas de água que se desenvolvem, aproximadamente, de nascente para poente e se estendem desde os limites norte aos limites sul da zona de intervenção do GAS.

Exemplos relevantes destas linhas são as ribeiras da Cascalheira, Forneco, Azinhal, Sancha. Moinhos, Esteveira, Junqueira e Morgavel.

* Manuscrito recebido em Maio de 1984. A discussão do trabalho está aberta por um período de três meses.

** Geólogo Especialista. Chefe de Divisão do Gabinete da Área de Sines.

Algumas destas linhas de água criaram na zona de estuário depressões de carácter lagunar, designadas geralmente por lagoas, das quais as de St.º André e Sancha são também exemplos relevantes.

1.2 – É óbvio que a construção de certas obras infra-estruturais do complexo de Sines acabaram por se defrontar com problemas geotécnicos, mais ou menos importantes, ligados à geologia e comportamento geomecânico das formações aluvionares das ribeiras e baixas. Estão nestas condições as redes viárias, esteiras industriais, rede de distribuição de águas, barragens de terra e outras.

Os dados geológicos e geomecânicos das formações aluvionares são ainda relevantes nos projectos de obras envolvendo recuperação ambiental de áreas degradadas (por exemplo lagoas) ou de aproveitamento agrícola ou agro-pecuário de zonas com solos agrícolas de muito boa qualidade.

1.3 – Os problemas geotécnicos das baixas aluvionares prendem-se, fundamentalmente, com a ocorrência de terrenos compressíveis, de comportamento diferencial, devido ao carácter errático da composição e da estratificação das camadas que os constituem.

A «Baixa de St.º André», na Área de Sines, é um bom exemplo deste tipo de situações, constituindo tema do presente artigo, Figs. 1 e 2.

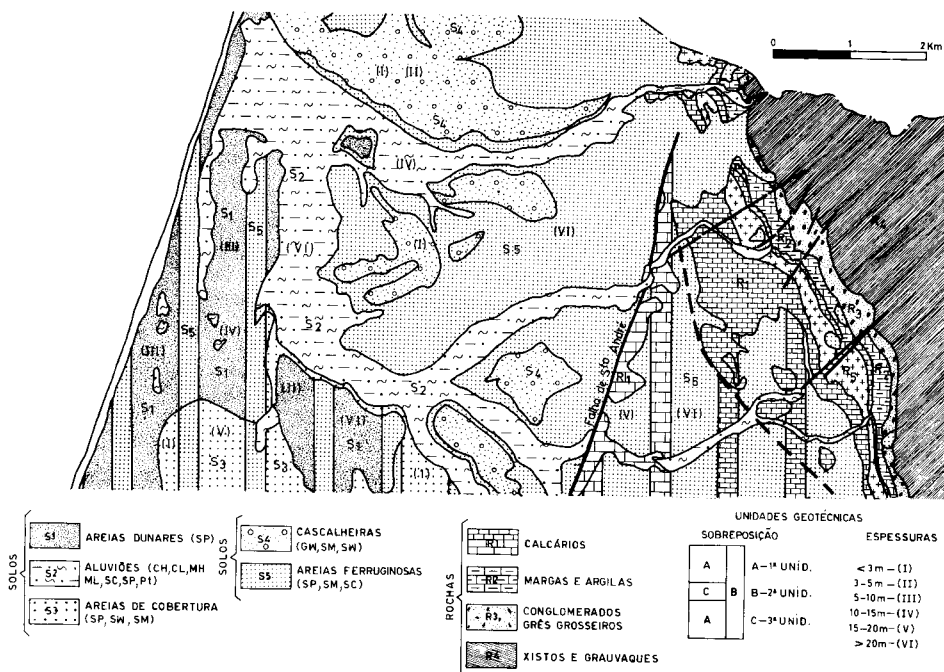


Fig. 1 — Carta geotécnica da área de St.º André-Deixa-O-Resto

2. – CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS COMPRESSÍVEIS

2.1 – Generalidades

Os solos* compressíveis são, geralmente, formações geológicas recentes, mais ou menos orgânicas, muito porosas, com elevados teores de humidade, grande deformabilidade e baixa resistência ao corte, a curto prazo.

Encontram-se vulgarmente nas aluviões sob a forma de camadas argilosas, lodosas e por vezes turfosas, interestratificadas de maneira irregular, com outros sedimentos menos deformáveis e mais resistentes.

São, pelo facto, maus terrenos de fundação de obras, com muito baixa capacidade de carga, experimentando grandes assentamentos diferenciais.

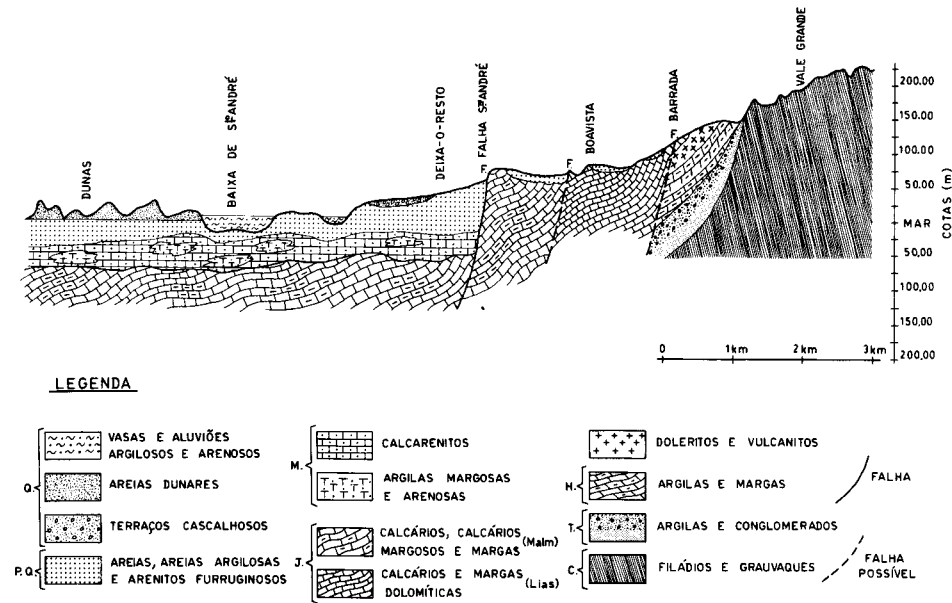


Fig. 2 — Corte geológico esquemático da área de St.º André-Deixa-O-Resto

* No presente artigo o termo solo é empregue de harmonia com o significado geotécnico: conjunto natural de partículas minerais que podem ser separadas por agitação na água.

Quantificar o comportamento mecânico dum terreno de fundação, que inclua a existência de solos compressíveis, não é tarefa fácil, requerendo conveniente informação de base, a saber:

- a) Boa definição da situação geológica, expressa sob a forma de cortes interpretativos do terreno, com a espessura, composição litológica e caracterização geotécnica de cada camada.
- b) Boa descrição da história geológica dos depósitos sedimentares, com destaque para os aspectos que, de algum modo, podem ter influenciado ou vir a influenciar o comportamento tensão-deformação dos sedimentos (sedimentação, compactação*, cimentação, diagénese, lixiviação, meteorização, etc.).
- c) Correcta determinação dos limites de Atterberg, do teor de humidade e da percentagem em matéria orgânica.
- d) Obtenção dos perfis de resistência e de deformabilidade com a profundidade, em particular com recurso às pás rotativas (vane test), penetrómetros e pressiómetros.
- e) Estudo laboratorial da consolidação primária e secundária, a primeira das quais sujeita a diferentes condições de drenagem.
- f) Estudo laboratorial da resistência ao corte a curto prazo e sua evolução no tempo, de acordo com o aumento de consolidação, distribuição espacial e anisotropia.

É evidente que os programas de estudo serão tanto mais rigorosos, quanto maior for a magnitude e complexidade geotécnica da obra a realizar.

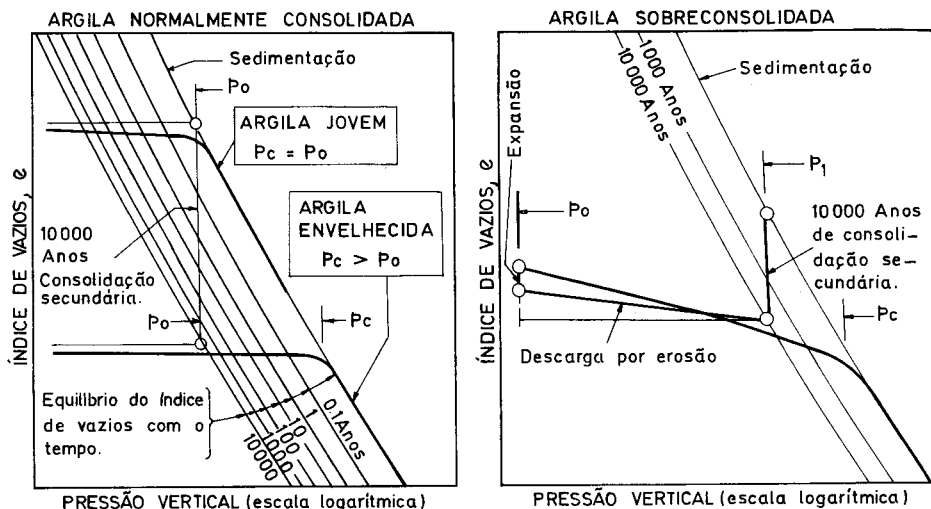
2.2 – *Influência da história geológica*

2.2.1 – A influência da história geológica no comportamento mecânico dos solos em questão, foi posta em evidência pelos trabalhos da NGI, com especial referência para Bjerrum (1973), Fig. 3.

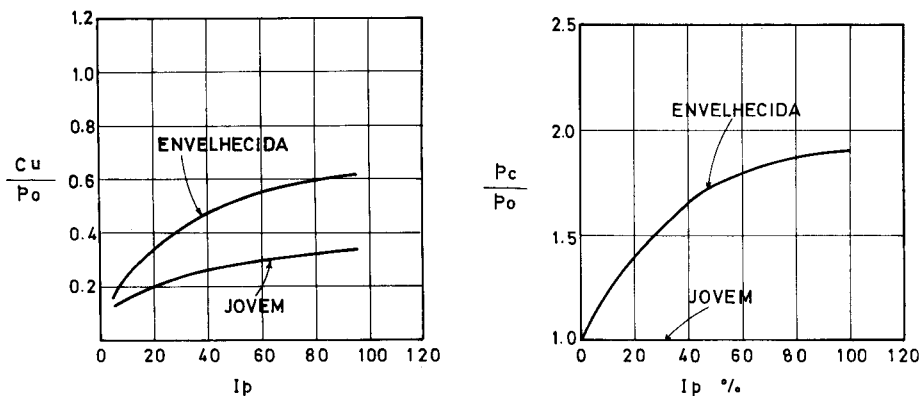
Um depósito argiloso recente que acabou de atingir, na sua evolução geológica, o máximo da consolidação primária**, sob o peso efectivo dos sedimentos subjacentes (p_o) e não sofreu efeitos secundários, é do ponto de vista geomecânico designado por «argila normalmente consolidada jovem». A curva $e = f(\log p)$ deste solo, obtida em edómetro, mostra uma curvatura apertada, correspondente à tensão efectiva (p_o) que a amostra suportou nas condições de jazida, Fig. 3a.

* O fenómeno designado «compactação» de um sedimento, em geologia, é denominado «consolidação», em mecânica dos solos.

** Consolidação primária é a fase de compactação de um sedimento, correspondente ao adensamento do mesmo, sob o peso das terras subjacentes e drenagem da água existente nos vazios.



a) Geohistória e compressibilidade de argilas normalmente consolidadas jovens e envelhecidas e argilas sobreconsolidadas.



b) Variação da razão de C_u/P_o e P_c/P_o com o índice de plasticidade em argilas normalmente consolidadas jovens e envelhecidas. C_u -resistência ao corte "vane teste";

Fig. 3 — Influência da geohistória na compressibilidade e na resistência ao corte (curto prazo) de sedimentos argilosos

Este tipo de terreno quando solicitado para tensões $< p_0$ é praticamente indeformável, mas para tensões $> p_0$ assenta drasticamente a um ritmo mais ou menos acelerado, que depende da permeabilidade e espessura da camada e também do posicionamento relativo dos estratos que actuam como drenos. Os perfis de resistência ao corte, obtidos «in situ» com as pás rotativas, revelam um aumento linear de C_u com a tensão efectiva. O valor de C_u/p_0 é um parâmetro característico do solo e depende, fundamentalmente, da sua plasticidade, Fig. 3 b.

No entanto, se o depósito sedimentar, depois de atingir o máximo da consolidação primária, sob o peso das terras sobrejacentes, envelhecer centenas ou milhares de anos, os efeitos dos fenómenos de consolidação secundária — que envolve um aumento gradual da viscosidade da água da dupla camada dos minerais argilosos e, progressivamente, orientação preferencial dos mesmos — continuam a manifestar-se por uma contínua diminuição do índice de vazios.

O processo é extremamente lento, comparado com o da consolidação primária e não origina variações da tensão intersticial. A curva $e = f(\log p)$ deste solo está também representada na Fig. 3 a e mostra, do mesmo modo, uma curvatura acentuada, mas com o ponto de inflexão a uma pressão $p_c > p_0$. Tal facto corresponderá, na prática, a um aumento de resistência e menor compressibilidade, podendo o terreno suportar uma carga superior ao peso efectivo das terras sobrejacentes, sem assentamentos tão drásticos como no caso da argila recente. Próximo de p_c a compressibilidade volta a manifestar-se drasticamente.

Este tipo de depósito sedimentar designa-se sob o ponto de vista geomecânico por «argila normalmente consolidada envelhecida». A resistência ao corte a curto prazo (C_u) aumenta linearmente com o peso efectivo das terras sobrejacentes, mas o valor C_u/p_0 é maior que a observada para os solos jovens, Fig. 3 b.

2.2.2 — Com o evoluir da história geológica, alguns depósitos sedimentares argilosos, devido a efeitos erosivos ou fusão de glaciares, podem ter sido sujeitos a tensões superiores ao actual peso efectivo das terras sobrejacentes. Este tipo de depósito sedimentar designa-se sob o ponto de vista geomecânico por «argila sobreconsolidada».

A curva $e = f(\log p)$ duma argila sobreconsolidada está representada na Fig. 3 a. Este depósito argiloso esteve previamente sujeito à tensão efectiva p_1 , sob a qual consolidou e envelheceu. Devido à erosão, o peso efectivo das terras sobrejacentes diminuiu, encontrando-se hoje em p_0 . Quando uma argila deste tipo é de novo solicitada mostra uma curvatura, cuja inflexão, a uma pressão $p_c > p_1$, se designa por tensão de pré-consolidação.

Na prática este tipo de terreno pode suportar cargas até pressões efectivas $\approx p_1$ sem variação volumétrica significativa. Solos argilosos sujeitos no passado a elevadas tensões, mesmo preconsolidados, são hoje em dia pouco ou muito pouco deformáveis na gama das solicitações usadas nas obras de engenharia.

É sabido que a sobreconsolidação pode também ser devida a oscilações da toalha freática.

Durante o efeito de descarga o solo expande, o teor de humidade aumenta e a resistência ao corte baixa de modo correspondente. A partir de determinada profundidade começa no entanto a aumentar em correspondência com a tensão efectiva que existia antes da erosão ou fusão dos gelos se dar.

Os fenómenos geológicos envolvendo troca iónica, lixiviação, cimentação, meteorização, etc., continuam a afectar, de modo sensível, as propriedades mecânicas dos solos.

2.3 – Prospecção e Avaliação das Propriedades Fundamentais

Não obstante ser conhecido um conjunto de premissas conducentes à caracterização geológica e geomecânica de maciços terrosos e no caso particular, de aluviões com solos compressíveis e de serem conhecidos métodos de análise de estabilidade, mais ou menos elaborados, continuam a existir casos de rotura ou de deficiente comportamento de obras em solos compressíveis, mesmo quando supostamente dimensionados do lado da segurança, LPC (1973), Bjerrum (1973).

Os estudos levados a efeito apontam para a deficiente quantificação das propriedades fundamentais dos solos, quer no âmbito dos ensaios laboratoriais, por má qualidade da amostragem indeformada, quer por deficiente realização e interpretação dos ensaios «in situ».

As dificuldades aumentam com o carácter errático da composição e estratificação das formações aluvionares facto que complica, ainda mais, a interpretação dos perfis e o ajustamento à realidade do modelo de cálculo.

Daí que se tivesse tentado, no caso vertente, conjugar um grande número de resultados de campo e de laboratório, tirando partido, fundamentalmente, de sondagens, ensaios de penetração dinâmica (SPT), de penetração estática com ponteira de Begemann (1965) e de pás rotativas, análises granulométricas, sedimentológicas e mineralógicas, limites de consistência, ensaios edométricos e ensaios de corte triaxial com medição da tensão intersticial.

A amostragem indeformada foi obtida com um amostrador Oesterberg, a fim de minimizar os efeitos de remeximento.

3. – CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DA BAIXA DE ST.º ANDRÉ

3.1 – Geomorfologia e origem

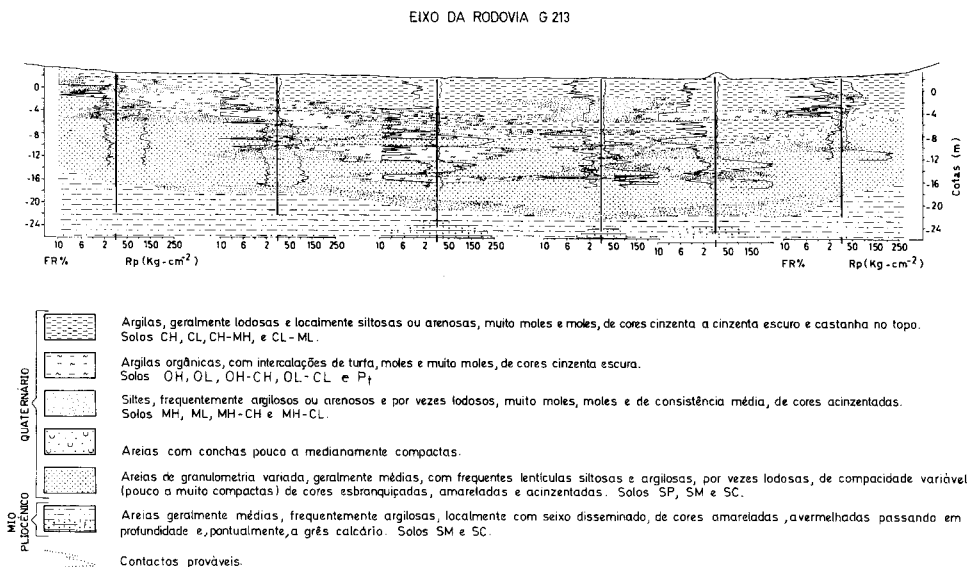
A «Lagoa de St.º André» é, sob o ponto de vista geomorfológico, uma pequena «laguna», localizada numa zona depressionária, onde confluem as ribeiras da Casca-leira, Ponte, Forneco e Azinhal, Fig. 1.

A lagoa formou-se, por isolamento da depressão, mercê do aparecimento de um cordão litoral que bloqueou a embocadura. A existência ao tempo de praias mais largas do que as de hoje, permitiu a formação de um sistema dunar concordante com a costa, que reforçou o isolamento da depressão.

A sedimentação que se processou ao longo da história geológica da bacia é do tipo fluvio-marinho e desenvolveu-se durante o Holocénico. Ocorrem lodos argilosos e siltosos alternando com areias. As vasas apresentam, localmente, conchas de «*Cardium edule*» e de outros lamelibrânquios e, acidentalmente, pequenos níveis de turfa. A ocorrência de turfas na zona da Lagoa de St.º André fora já divulgada por Zbyszewsky (1979).

Os sedimentos estão estratificados irregularmente de modo intercruzado, com passagem lateral de fácies, em camadas, bolsadas e lenticulas.

Todavia e não obstante o carácter errático da formação, verifica-se que os sedimentos lodosos, argilosos e siltosos predominam no topo e os arenosos na base (Fig. 4).



As aluviões fluvio-marinhos da lagoa atingem nas zonas prospectadas, espessuras que vão até cerca de 24 m e cotas de - 22 m, passando gradualmente para montante da Lagoa e ao longo das ribeiras, a aluviões tipicamente fluviais, mais arenosos e inclusivamente cascalhosos.

Do lado do mar, com particular destaque para a zona ao abrigo do sistema dunar, aparecem ainda depósitos eólicos sobre as aluviões. Do mesmo lado, é ainda típica a ocorrência de uma fracção arenosa eolisada à mistura com os sedimentos lagunares.

As formações aluvionares repousam, em geral, sobre o Plio-Plistocénico e, eventualmente, sobre o Miocénico compostos pelos seus característicos depósitos de areias argilosas avermelhadas e amareladas, areias argilosas amareladas micáceas e calca-renitos.

3.2 – *Composição granulométrica e mineralógica*

Os depósitos arenosos são formados por areias de granulometria variável, Fig. 5, geralmente médias, moderadamente calibradas* a moderadamente bem calibradas e, mais raramente, finas e grossas moderadamente bem calibradas a mal calibradas. De modo singular, ocorrem também areias bem calibradas.

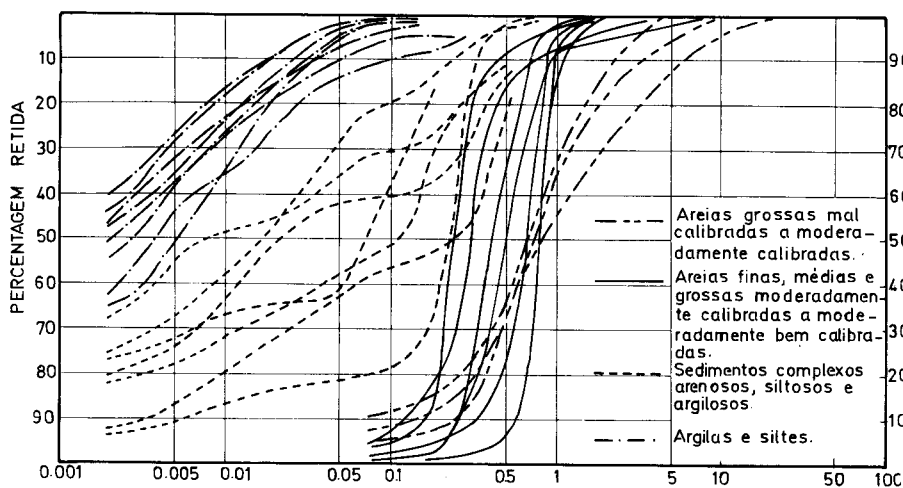
As areias são predominantemente constituídas por grãos de quartzo, que apresentam morfoscopia diferenciada, função da respectiva origem: nas areias eolisadas encontra-se abundância de grãos redondos-foscas, mormente nas fracções mais grosseiras e nas areias fluvio-marinhas, ocorrem grãos do tipo brilhante-amassado e brilhante.

Nos depósitos argilosos predominam a illite, caulinite e interestratificados de illite-montmorilonite, com relevo para os minerais com espaçamentos basais de 9,9 Å. A illite é quase sempre aberta e hidratada, com espaçamento interfoliar que expande ligeiramente com auxílio de polialcoóis, Fig. 6. Os minerais com expansão intracristalina devem ainda possuir «interlayers» removíveis com ditonito de sódio, que evitam o total colapso das estruturas para 9,9 Å após a saturação com K⁺ ou aquecimento a 550°C. As «interlayers» são eventualmente constituídas por compostos férricos e húmicos.

Os depósitos silteosos e mistos de areia, silte e argila têm composições intermédias aparecendo quartzo e minerais argilosos, acompanhados por vezes de pequenas quantidades de feldspatos e ainda de carbonatos.

À superfície, até cerca de 1 a 2 m de profundidade, os sedimentos argilosos e silteosos aparecem ainda com hidróxidos e óxidos de ferro (goethite e hematite), que lhes conferem a cor acastanhada e castanho-avermelhada.

* Calibragem segundo a nomenclatura de Friedman (1962).



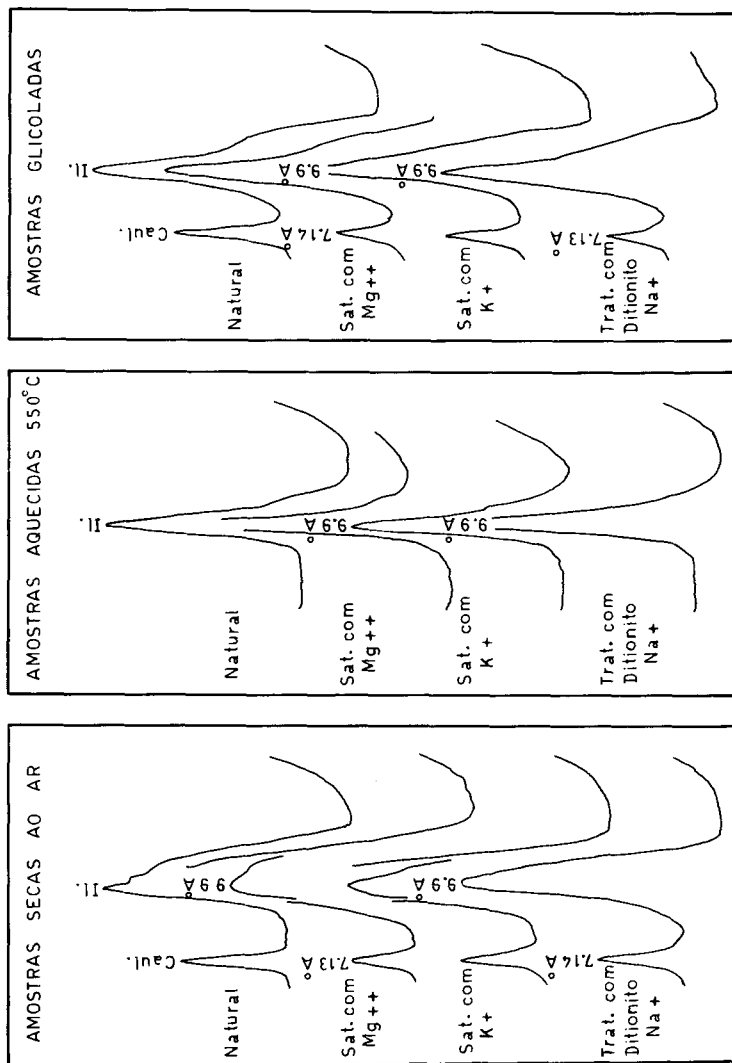


Fig. 6 — Diagramas de raios-X de argilas da baixa de St.^o André

Quando lodosos estes mesmos depósitos são de cor cinzenta escura, contendo teores em matéria orgânica que oscilam na ordem dos 2 a 10%.

3.3 – Estrutura da bacia e condicionantes geológicos

A heterogeneidade dos depósitos dificulta o estabelecimento de cortes geológicos precisos, mesmo com o recurso a elevado número de sondagens. Na Fig. 4 apresenta-se uma das interpretações possíveis, realizada ao longo do traçado da rodovia G-213. Neste corte e tendo em vista o objectivo geomecânico do trabalho, os aspectos sedimentológicos foram sacrificados aos aspectos geotécnicos.

Na elaboração do corte foram usados meios directos, tais como testemunhos de sondagens e análises laboratoriais de amostragem e meios indirectos, como utilização da razão de atrito FR (%) determinada com o penetrómetro holandês. Este parâmetro que será analisado em detalhe no capítulo seguinte é definido:

$$FR \% = \frac{f_s \text{ (atrito lateral unitário)}}{R_p \text{ (resistência de ponta)}} \times 100$$

O método indirecto foi extremamente proveitoso, após conveniente aferição, uma vez que os perfis são contínuos e o equipamento é de grande mobilidade e facilidade de manejo.

Tendo em vista os resultados obtidos e a história geológica da bacia, é possível destacar alguns aspectos que parecem mais marcantes, para efeitos de interpretação do comportamento mecânico:

- a) Os depósitos são muito recentes, nitidamente pós Flandriano e formaram-se na dependência das formações mais antigas, em meio marcadamente transicional e do tipo lagunar, sob influência marinha, fluvial e eólica.
- b) A sedimentação argilosa parece fundamentalmente herdada das formações margosas e argilosas do Jurássico (Malm), havendo uma grande semelhança entre a composição mineralógica das argilas aluvionares da lagoa e das margas da escarpa da falha de St.º André. No entanto a comparticipação das formações miopliocénicas é em certas circunstâncias também bem marcada.
- c) Há nítida intercalação de episódios argilosos e arenosos, inclusivamente com passagem lateral de fácies, ocorrendo, por exemplo, lodos encravados no seio de material detrítico mais grosseiro e vice-versa. Não obstante, os sedimentos argilosos e lodosos predominam no topo e os arenosos na base.
- d) Não parece ter havido acções importantes de erosão de depósitos sobrejacentes, nem efeitos significativos de acções de lixiviação, de troca catiónica, de cimentação, ou de meteorização.

- e) Os depósitos estiveram sempre abaixo do nível piezométrico mantendo-se sempre saturados, à excepção da actual camada superficial de 1 a 2 m, que tem sofrido efeitos da variação da toalha freática. Esta camada superficial encontra-se, inclusivamente oxidada.

4. – CARACTERÍSTICAS GEOMECÂNICAS DA BAIXA DE ST.º ANDRÉ

4.1 – *Propriedades «index»*

Os sedimentos argilosos estudados situam-se na carta de plasticidade acima e ao longo da linha A, Fig. 5, sendo classificados usualmente como solos da classe CH*, com valores de limite de liquidez (W_L) e índices de plasticidade (IP) variando respectivamente de 50% a 188% e 30 a 125%. Ocasionalmente, estes solos caem abaixo da linha A, comportando-se como siltes, solos da classe MH ou OH*, muito provavelmente devido a efeito da matéria orgânica e de minerais abertos.

À superfície, na zona de alteração, estas argilas originalmente de cor cinzenta escura, adquirem tons acastanhados e castanho-avermelhados, perdem plasticidade e têm um comportamento mais aparentado com solos do tipo MH.

Os sedimentos arenosos são quase exclusivamente da classe SP, não satisfazendo os requisitos da classificação unificada para areias bem graduadas.

Os sedimentos de composição granulométrica intermédia enquadram-se, mormente, nas classes CL, ML, SC e SM*.

A distribuição dos solos na carta de plasticidade mostra ainda que os limites de consistência determinados caem na zona de influência da ilite, o que está de acordo com a mineralogia determinada, existindo alguns casos de excepção acima e abaixo da banda ilítica. Para cima desempenha papel importante o aumento da percentagem de minerais interestratificados com montmorilonite e, localizadamente, a ocorrência deste mesmo mineral. Para baixo actua o efeito da caulinite e de minerais não plásticos com granulometria inferior ao peneiro N.º 40 da série ASTM.

A matéria orgânica contribui ainda marcadamente, muito em especial quando ocorre sob a forma esponjosa apta a reter, nos respectivos interstícios, grande quantidade de água. Esta água é praticamente inefectiva em produzir plasticidade, originando no entanto valores muito elevados, quer dos limites de liquidez, quer do limite de plasticidade. Em termos relativos IP é baixo em relação a W_L , situando-se os solos francamente abaixo da linha A. A destruição da matéria orgânica por secagem, mesmo a temperaturas baixas (60°C), origina uma grande transformação de comportamento, como se pode verificar na Fig. 5 com o caso das turfás.

* CH – argilas de elevada plasticidade; MH – siltes de elevada plasticidade; CL – argilas de baixa plasticidade; ML – siltes de baixa plasticidade; SC – areias argilosas; SM – areias siltosas; OH – solos orgânicos de elevada plasticidade; OL – solos orgânicos de baixa plasticidade; SP – areias mal graduadas.

4.2 – Resistência à penetração estática e dinâmica

No que diz respeito à resistência e deformabilidade foram realizados «in situ» ensaios de penetração estática (penetrômetro holandês) e ensaios de penetração dinâmica (SPT) e de pás rotativas (vane test) e no laboratório, ensaios edométricos e de corte triaxial com controle da tensão intersticial, Figs. 7 e 9.

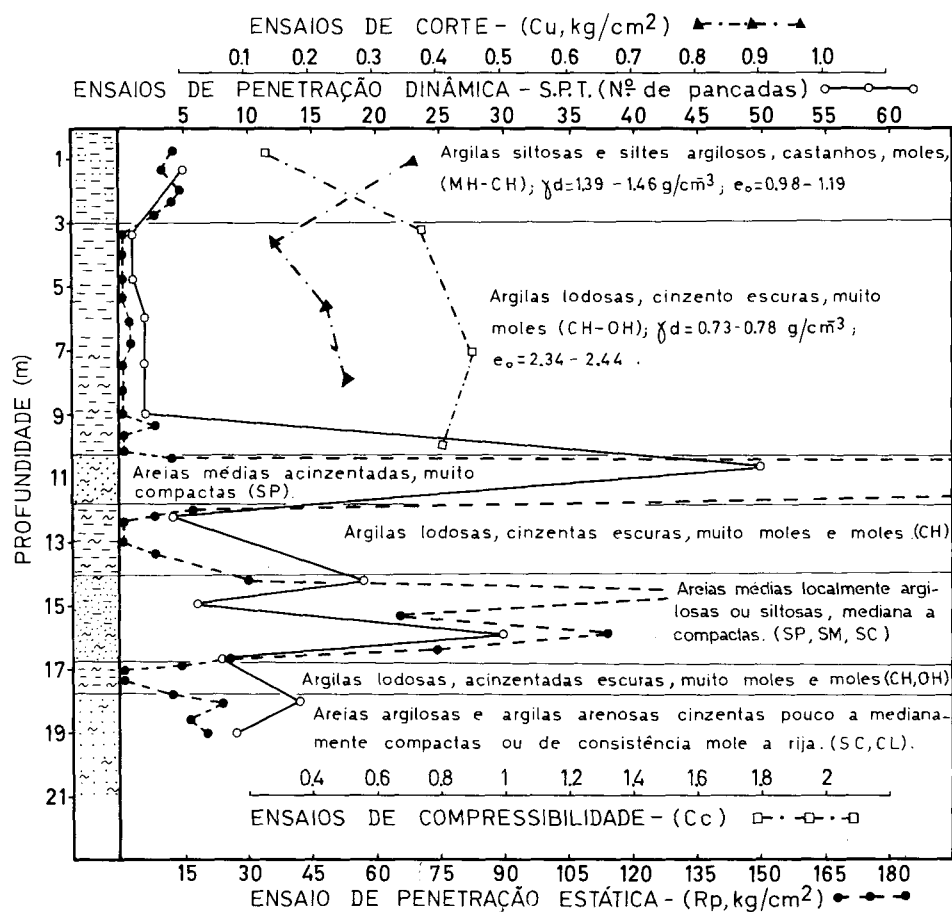


Fig. 7 — Correlação entre dados de sondagens, resistência à penetração, corte e compressibilidade

Os perfis de resistência à penetração estática e dinâmica mostram que as camadas de solos argilosos têm consistência mole e muito mole, especialmente até profundidades máximas de cerca de 14 m e as camadas arenosas apresentam compactidade variável de pouco a muito compactas, Figs. 4 e 7. Para os solos compressíveis, a correlação entre a resistência de ponta do penetrômetro estático R_p (kg/cm^2) e o número de pancadas (N) do ensaio SPT deu:

$$R_p = 2 + 1,4 N \quad (\text{coef. correlação} = 0,7)$$

Por outro lado, os dados do penetrômetro holandês, utilizando a ponteira de Begemann (1965), constituíram um precioso auxiliar para definir a litologia das formações. Para o efeito recorreu-se à correlação entre a resistência de ponta R_p (kg/cm^2) e a razão de atrito FR (%) de harmonia com os trabalhos de Schmertmann (1969) e Sanglerat (1972, 1977), Fig. 8.

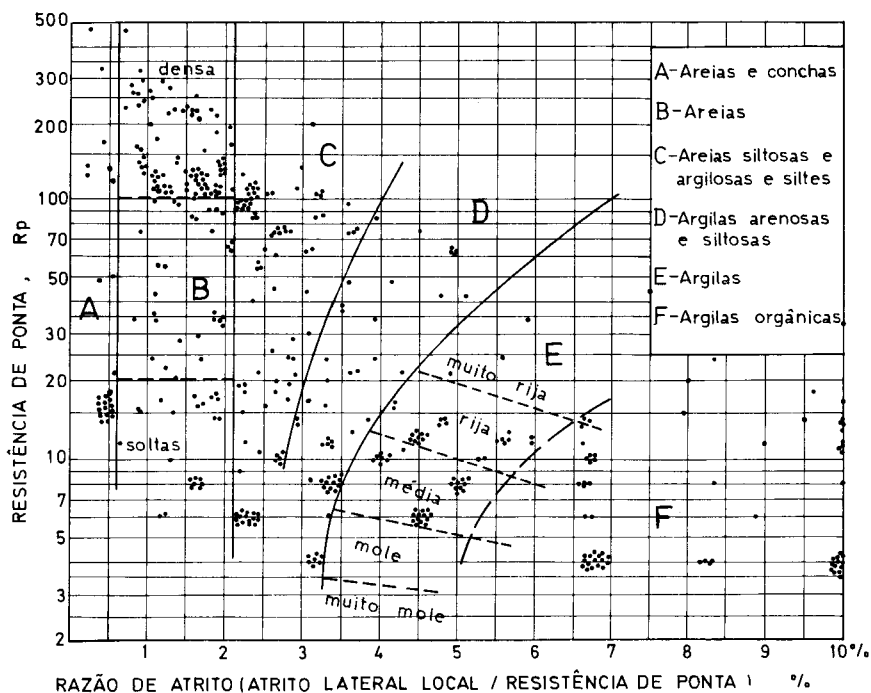


Fig. 8 — Correlação entre a resistência de ponta e a razão de atrito, obtida com o penetrômetro holandês, nas aluviões da Baixa de St.º André

Os valores de FR relativos aos solos da Baixa de St.º André podem resumir-se da seguinte maneira:

- areias ricas em conchas (0-0,5)
- areias (0,5-2,5)
- siltes (2,5-3,5)
- argilas (3,5-7)
- argilas orgânicas e eventualmente turfas (> 7)

No corte geológico-geoténico da Fig. 4 é possível comparar os perfis da resistência de ponta e da razão de atrito com a litologia e estratificação, o que mostra que aqueles parâmetros, são de facto, uma característica intrínseca das camadas.

4.3 – *Consolidação e resistência ao corte*

Em termos de resistência ao corte e compressibilidade a atenção incidiu, exclusivamente, nos solos compressíveis muito moles e moles, até profundidades da ordem dos doze metros.

Conjuntamente com os perfis de penetração dinâmica e estática foram comparados perfis de resistência ao corte (C_u) e de coeficiente de compressibilidade (C_c), obtidos, respectivamente, a partir de ensaios com pás rotativas e de ensaios edométricos com amostras indeformadas. Na Fig. 7 apresenta-se um exemplo deste estudo comparativo.

À superfície na zona onde se deu sobreconsolidação, devido a oscilações da toalha freática, a resistência ao corte deu resultados da ordem dos 0,318 a 0,397 kg/cm², enquanto o coeficiente de compressibilidade oscilou entre 0,25 e 0,38. Nas camadas de solos compressíveis subjacentes, a resistência ao corte baixa e a compressibilidade aumenta até valores de 0,087 kg/cm² e 1,19 logo por debaixo da zona sobreconsolidada, a partir do que, em profundidade, se verifica um aumento gradual de C_u comportando-se C_c ao inverso. Localmente, são de admitir variações pontuais motivadas por diferente litologia e composição de finas camadas ou lenticulas interestratificadas, não sendo nem se podendo admitir, um perfil homogéneo, cuja resistência depende somente do estado de consolidação do solo. Os máximos valores de C_u obtidos foram 0,400 kg/cm² e os mínimos valores de C_c 0,64.

Calculando o peso efectivo das terras sobrejacentes, verifica-se que os valores de C_u/p_o e p_c/p_o em relação ao índice de plasticidade Fig. 3 b não se enquadram com as curvas de Bjerrum (1973), encontrando-se razões de C_u/p_o consentâneas com argilas normalmente consolidadas envelhecidas, ou mesmo acima destas, enquanto que os valores de p_c/p_o são próximos da unidade muitas vezes ligeiramente inferiores.

Bjerrum (1973) fazendo a análise de catorze casos de rotura de aterros construídos sobre solos moles, procurou comparar valores de resistência ao corte, deduzidos de ensaios de pás rotativas com a resistência ao corte mobilizada nos terrenos de fundação

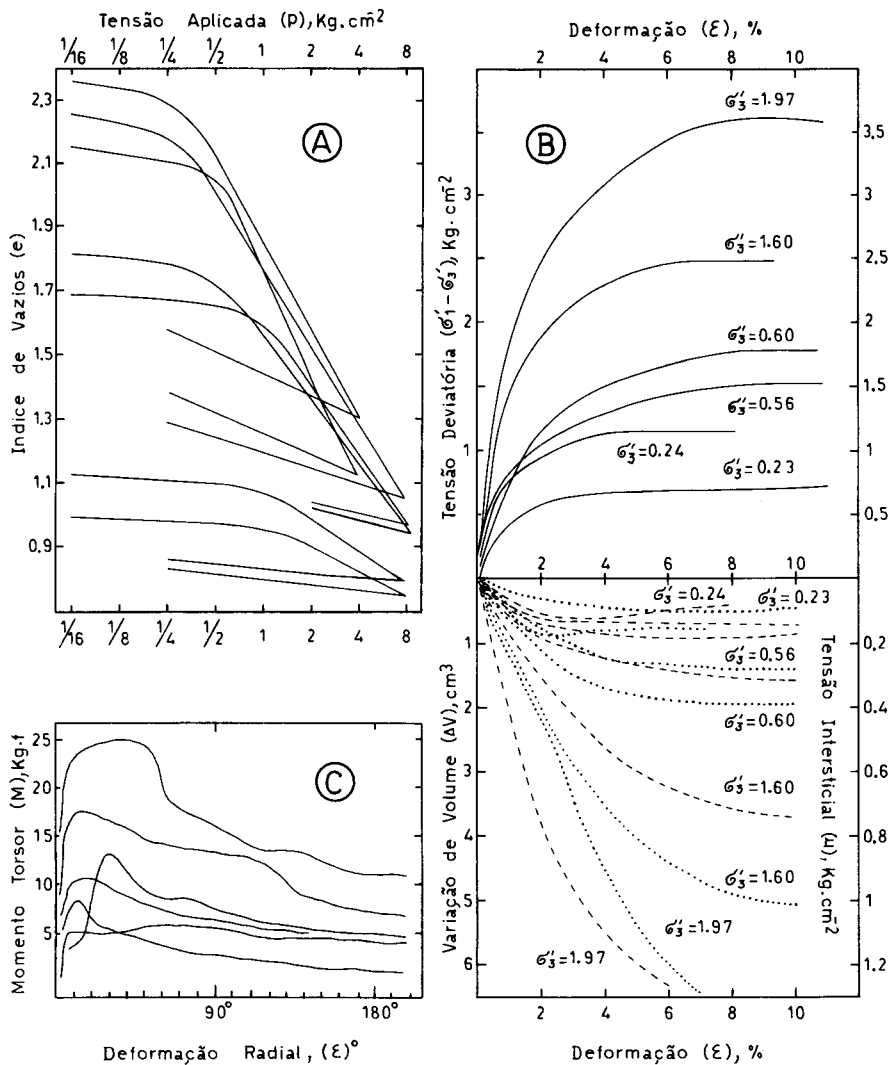


Fig. 9 — Comportamento tensão-deformação e variação volumétrica de solos argilosos aluvionares da Baixa de St.º André.

a) Ensaio edométrico; curvas $e = f(\log p)$

b) Ensaio de corte triaxial não drenado; curvas tensão-deformação, variação volumétrica e variação da tensão intersticial.

c) Ensaio de corte «in situ» (vane test); curvas de registo.

dos aterros, na fase de rotura. Os resultados obtidos mostraram que os resultados dos ensaios de corte rotativo eram superiores aos valores reais ocorridos nas superfícies de rotura, conduzindo a valores de coeficiente de segurança superiores à unidade. A discrepância está relacionada com a velocidade a que se procede à aplicação da solicitação, que é grande no caso do ensaio das pás rotativas e pequena no caso da obra. Tal facto leva a considerar a influência da fase viscosa ou seja o efeito da dupla camada dos minerais argilosos envolvidos que influi marcadamente nos limites de consistência.

Neste sentido Bjerrum (1973) verificou que a discrepância se acentuava com o aumento do índice de plasticidade do solo, facto que o levou a propor um factor correctivo para os ensaios de pás rotativas; função daquele índice.

Utilizando este factor de correcção para valores de IP entre 50% e 100%, os resultados de C_u/p_o aproximam-se mais da curva dos solos normalmente consolidados jovens do que de solos normalmente consolidados envelhecidos, o que também está mais de acordo com a história geológica da bacia da Baixa de St.º André.

Por outro lado, tendo em atenção os valores da resistência à penetração e especialmente (R_p), seria ainda de esperar que (C_u) fosse manifestamente inferior aos resultados fornecidos pelas pás rotativas ($C_u = R_p/A$ com A assumindo valores entre 15 e 25).

O comportamento tensão-deformação dos solos estudados, resumido na Fig. 9 corrobora ainda este ponto de vista.

É no entanto de admitir que alguns sedimentos, eventualmente os mais plásticos e consequentemente mais ricos em ilite-montmorilonite possam ter sofrido já efeitos da consolidação secundária, face à espessa dupla camada de água que estes minerais contêm, especialmente, a montmorilonite.

Como é sabido as fases de consolidação primária e secundária não são separadas por uma fronteira nítida, podendo ocorrer sobreposições dos dois fenómenos, mais acentuadamente, na parte final da consolidação hidrodinâmica.

5. – CONCLUSÕES

- a) A «Baixa de St.º André» possui ocorrências de solos aluvionares compressíveis que será necessário ter em conta em eventuais projectos que envolvam vias de comunicação, diques, drenagens, canais de irrigação, dragagens, etc.
- b) Os perfis obtidos puderam ser melhor interpretados graças à utilização do penetrómetro holandês equipado com ponteira de Begemann que permitiu a utilização da razão de atrito para a caracterização litológica da estratificação. Os valores de FR (%) para a Baixa de St.º André sugerem os seguintes limites: areias e conchas (< 0,5), areias (0,5-2,5), siltes (2,5-3,5), argilas (3,5-7), argilas orgânicas e eventualmente turfas (> 7).

- c) As formações compressíveis poderão considerar-se como solos normalmente consolidados jovens com $p_c/p_o = 1$, bem recentes na escala dos tempos geológicos, chamando-se no entanto a atenção para os valores da tensão de rotura, obtidos com as pás rotativas, estarem frequentemente acima do que seria de esperar por efeito da consolidação sob a tensão efectiva das terras sobrejacentes.
- d) A elevada plasticidade de alguns destes solos compressíveis, ricos em ilite-montmorilonite, geralmente com IP entre 40 e 60 e ainda, embora mais raramente, entre 100 e 120, contribui marcadamente para aqueles valores de C_u , que devem ser corrigidos, por exemplo segundo os dados de Bjerrum. Outra forma seria tentar utilizar equipamento de pás rotativas no qual a rotura do terreno fosse obtida com velocidades angulares bem mais baixas do que 0,2°/s.
- e) Os valores obtidos com o penetómetro holandês parecem mais consentâneos com a realidade usando a expressão $C_u = R_p/A$, variando A entre 15 e 20.
- f) A obtenção dos limites de consistência deve ser feita com muito rigor, tendo em atenção que a secagem na estufa destes solos, mesmo a temperaturas da ordem dos 60°C pode diminuir drasticamente os valores de IP, não só em solos turfosos, mas também em solos de ilite-montmorilonite levemente orgânicos. A desidratação que se opera em certos tactóides é irreversível. Deste modo, devem as amostras ser trabalhadas no laboratório ao teor natural de humidade, sem secagem prévia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEGEMANN, H. K. S. (1965) — «The friction jacket cone as an aid in determining the soil profile». Proc. Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., 6th, MONTREAL.
- BJERRUM, L. (1973) — «Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils (collapsible, expansive and others)». Proc. Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., 8th, MOSCOW.
- FRIEDMAN, G. M. (1962) — «On sorting, sorting coefficient and the lognormality of the grain-size distribution of sandstone». Journal of Geology, 70 (6), CHICAGO.
- L. P. C. (1973) — «Remblais sur sols compressibles». Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. Spécial T, PARIS.
- SANGLERAT, G. (1972) — «The penetrometer and soil exploration». Elsevier Scientific Publ. Comp., AMSTERDAM.
- SANGLERAT, G. (1977) — «Les penetrometre statique-dynamique et ses diverses applications pratiques». Imprimerie du Batiment, LYON.
- SCHMERTMANN, J. H. (1969) — «Dutch friction cone penetrometer exploration of research area at Eglin Air Force Base, Florida», U. S. Army Eng. Waterways Exp. Station, Rep. S-69-4. VICKSBURG.
- ZBYSEWSKY, G (1979) — «Ocorrências de turfas em Portugal». Boletim de Minas 16 (3/4), LISBOA.