

ACERCA DE UM SOLO ARENO-SILTOSO EXPANSIVO COM HIDROBIOTITE VERMICULITE E MONTMORILONITE

Regarding an expansive, silty-sand soil with hydrobiotite vermiculite and montmorillonite

por

J. A. HORTA DA SILVA *

RESUMO – Durante os estudos geotécnicos preliminares da futura estrada Maria Teresa-Salazar, (trecho Maria Teresa-Cachilo) encontrou-se um solo areno-siltoso, que apresenta comportamento expansivo, quando compactado.

Neste trabalho, apresenta-se um estudo detalhado da mineralogia e fábrica do solo e discute-se o seu comportamento expansivo, em termos de vários factores que podem afectar a expansão.

Conclui-se que o solo expande, não só devido à presença de certa quantidade de montmorillonite na fracção argilosa, mas também devido à presença de grande quantidade de hidrobiotite nas fracções siltosas e arenosa. As condições de compactação, tais como energia de compactação, também afectam o comportamento do material, devido à influência na baridade seca e na orientação preferencial dos minerais que se comportam como argila.

SYNOPSIS – During the preliminary geotechnical studies of the future road between Maria Teresa and Salazar (Maria Teresa-Cachilo stretch) a silty-sand soil has been found which undergoes an expansive behaviour, when compacted.

In this paper, a detailed study of the mineralogy and fabric of the soil is presented and a discussion is provided on the expansive behaviour, in terms of the various factors which can effect the expansion.

It was concluded that the soil swells, not only due to the presence of montmorillonite in the clay fraction, but also due to the presence of a good deal of hydrobiotite and vermiculite in the silty and sandy fractions. The compaction conditions, such as the compaction energy, also affect the behaviour of the material, due to the influence upon the dry density and preferential orientation of the minerals which behave as clay.

* Geólogo, Especialista do Laboratório de Engenharia de Angola

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – No decurso dos estudos geotécnicos preliminares da futura estrada Maria Teresa-Salazar (trecho Maria Teresa-Cachilo), verificou-se a ocorrência de um tipo de solo que, não obstante ser areno-siltoso*, apresentava expansões que atingiam a ordem dos 9% quando compactado no molde CBR.

No Quadro I e a título de exemplo, apresentam-se as principais características geotécnicas do solo, tendo em vista a sua aptidão como material de construção de estradas.

1.2 – As discrepâncias verificadas entre as propriedades índice** e a percentagem de expansão medida no molde CBR conduziram à necessidade de estudar o solo com mais pormenor, no sentido de se averiguarem as causas que originaram as anomalias registadas.

Na presente nota, apresenta-se um resumo dos estudos efectuados e, em face dos resultados obtidos, formulam-se alguns considerandos sobre os factores que determinaram o comportamento geotécnico do solo.

2 – ESTUDO MINERALÓGICO DO SOLO

2.1 – O estudo da composição mineralógica incidiu sobre a amostra total e respectivas fracções argilosa, siltosa e arenosa, tendo-se utilizado diversos processos de análise, mormente difracção de raios-X, análise térmica diferencial e análise termo-gravimétrica.

A separação das fracções fez-se por peneiração e sedimentação, sendo o material disperso em água destilada com o auxílio de um vibrador ultrassónico.

Para a identificação dos minerais pelo raios-X recorreu-se a diversas técnicas auxiliares, tais como preparações orientadas com a finalidade de realçar os reflexos basais dos filossilicatos, preparações completamente desordenadas obtidas em amostrador de empacotamento lateral (Horta da Silva, 1968), saturação das amostras com vários catiões de troca, muito em especial Mg^{++} e K^+ , solvatação com glicerol e aquecimento a várias temperaturas, nomeadamente a 350° C e a 550° C. Nas análises térmicas os materiais foram analisados quer secos

* – De acordo com a classificação textural, LNEC norma E 219-68

** – Granulometria, consistência e potencialidade de expansão segundo Van der Merwe (1964)

à temperatura e humidade ambiente, quer estabilizados em atmosfera controlada com uma humidade relativa de 60%. Aliás, este esquema analítico constitui, hoje, prática corrente no Laboratório de Engenharia de Angola.

Os resultados destes estudos revelaram que o solo era essencialmente constituído por quartzo, feldspatos (mormente uma plagioclase rica em molécula albítica)*, hidrobiotite**, vermiculite, biotite, caulinite estruturalmente desordenada e montmorilonite, a que se associam com menor significado, interestratificados irregulares contendo folhetos de mica, vermiculite e montmorilonite.

Na fracção argilosa predominam a caulinite e a montmorilonite acompanhadas de muito pequenas quantidades ou vestígios de hidrobiotite, vermiculite e interestratificados irregulares de camadas montmoriloníticas, vermiculíticas e ílticas. Na fracção siltosa predominam a hidrobiotite e vermiculite, acompanhadas de pequenas quantidades de quartzo, feldspatos, caulinite*** e biotite, e de interestratificados irregulares de biotite, vermiculite e montmorilonite. Finalmente, na fracção arenosa, predominam quartzo e feldspatos, acompanhados de pequenas quantidades de biotite hidrobiotite e vermiculite, aos quais se associam por vezes vestígios de caulinite***, e interestratificados irregulares biotite-vermiculite.

2.2 – Uma estima aproximada de percentagem de caulinite e montmorilonite na fracção argilosa revelou, respectivamente, valores da ordem dos 50% e 40%. Tendo em conta que a percentagem de partículas argilosas ($<2\mu$) anda nesta amostra pelos 18%, é de inferir que a percentagem de montmorilonite, no solo total, é muito pequena, não justificando só por si, o comportamento expansivo do material compactado.

Dos restantes constituintes do solo, aqueles que poderiam ter ainda uma contribuição efectiva na expansão, por terem rede cristalina expansiva, seriam a vermiculite, a hidrobiotite e os interestratificados irregulares envolvendo camadas montmoriloníticas e vermiculíticas. Estes interestratificados existem em pequena quantidade e nesta medida, as atenções concentraram-se na ocorrência de vermiculite e hidrobiotite.

* – Pequenas quantidades ou vestígios de microclina foram também assinalados.

** – Hidrobiotite – interestratificado regular 1/1 biotite – vermiculite.

*** – A ocorrência de caulinite no silte e na areia deve verificar-se sob a forma de agregados ou atapetando a superfície das palhetas micácias (ver por exemplo Figueiredo Gomes, 1970).

2.3 – Para estimar a percentagem destes minerais nas fracções grosseiras do solo (silte e areia) procedeu-se em primeiro lugar à sua separação no sentido de utilizar os próprios cristais do material em estudo, como padrão. As palhetas de hidrobiotite e vermiculite foram isoladas à lupa estereoscópica, por meio de uma barra de ebonite electrizada. Nas Figs. 1, 2 e 3 apresentam-se os diagramas de raios-X, a.t.d. e a.t.g. do padrão isolado.

De acordo com os dados fornecidos pela difracção de raios-X verifica-se que, não foi possível isolar a hidrobiotite da vermiculite, o que é compreensível, se atendermos que estes minerais ocorrem associados nas mesmas palhetas, frequentemente, ainda acompanhados de biotite e até de interestratificados irregulares biotite – vermiculite e vermiculite – montmorilonite. Tal facto já foi registado por vários autores, tais como Wilson (1970), e deve-se à sequência da transformação biotite → hidrobiotite → vermiculite → montmorilonite. Dados de raios-X e a.t.d. revelaram que, a mica padrão seleccionada contém ainda uma ligeira impureza de caulinite, provavelmente aderente às palhetas micácias, como aconteceu nos estudos levados a efeito por Figueiredo Gomes (1970).

As estimas globais aproximadas das percentagens de hidrobiotite e vermiculite nas fracções siltosa e arenosa, efectuadas com base no padrão referido, mostraram, respectivamente, valores da ordem dos 60% a 70% e 20% a 30%.

3 – INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO SOLO NO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO

3.1 – É sabido que a composição dos solos (granulometria, mineralogia e matéria orgânica*) constitui um dos principais factores determinativos das suas propriedades geotécnicas. No que se refere à expansibilidade, é lógico admitir que esta propriedade aumenta com o teor de argila e portanto os solos argilosos são potencialmente mais expansivos do que os solos siltosos ou arenosos. Novais-Ferreira e Horta da Silva (1973), utilizando misturas binárias de areia** e argila, demonstraram que em solos predominantemente montmoriloníticos, quer a percentagem de expansão quer a força de expansão aumentam com a percentagem de partículas <2 μ , muito em especial, no intervalo 40% a 90% de material argiloso.

* – No caso presente o solo é praticamente isento de compostos orgânicos.

** – Quartzo.

QUADRO I – Características geotécnicas do solo

Cor Munsell – seco 10yR 6/4; molhada 10yR 5/4			
Granulometria – areia 62%; silte 20%; argila 18%			
Consistência – WL 37%; WP 24%; WS 18%; IP 13%; IS 19%			
Densidade das partículas (G) – 2,78			
Classificação AASHO – A 6 (2)			
Compactação	normal (ótimo) – γ_d 1,77 g/cm ³ ; w = 16%		
	pesada (ótimo) – γ_d 1,99 g/cm ³ ; w = 12,2%		
C B R	γ_d = 1,63 g/cm ³	w = 12,1%	I = 1,4%; S = < 1%
	γ_d = 1,78 g/cm ³	w = 11,9%	I = 3,7%; S = < 1%
	γ_d = 1,94 g/cm ³	w = 11,8%	I = 8%; S = 1,6%
Potencialidade de expansão (IP/% < 2 μ) – média a baixa			

γ_d – baridade seca; w – teor de humidade

I – CBR face inferior; S – CBR face superior

Potencialidade de expansão segundo Van der Merwe (1964)

QUADRO II – Espaçamentos basais em Å formados durante a hidratação da montmorilonite com vários catiões (Brown, 1961)

H ₃ O	Li	Na	K	NH ₄	Cs	Mg	Ca	Sr	Ba
10,0	9,5	9,5	10,0	10,0	12	9,5	9,5	9,5	9,8
12,4	12,4	12,4	12,4	?	–	–	–	12,0	12,0
15,4	15,4	15,4	15,0	15,0	–	15,4	15,4	15,5	15,5
19,0 (18,4)	19,0	19,0	–	–	–	19,2	18,9	?	18,9
22,4 (21,4)	22,5	–	–	–	–	–	–	–	–

QUADRO III – Espaçamentos basais em Å de vermiculites macroscópicas saturadas com diversos catiões, (Brown, 1961)

Catião	Vermic. de Co. Macon		Vermiculite do Quênia			
	Seca ao ar	em água	H.R.* 30%	H.R.* 50%	H.R.* 70%	em água
H	14,3	–	–	–	–	–
Li	12,6	15,1	12,3	15,0	15,0	dissociação
Na	12,6	14,8	12,3	14,8	14,8	14,8
K	10,4	10,6	10,5	–	10,6	13,0
NH ₄	11,2	11,2	10,8	–	10,8	10,9
Rb	11,2	11,2	–	–	–	–
Cs	12,0	12,0	–	–	–	–
Mg	14,3	14,5	14,4	14,4	14,4	14,7
Ca	15,1	15,4	15,0	15,0	15,1	15,3
Sr	–	–	–	14,9	–	15,4
Ba	12,6	15,4	12,3	15,0	15,2	15,7
Al.	–	–	14,0	–	–	–

* – Humidade relativa.

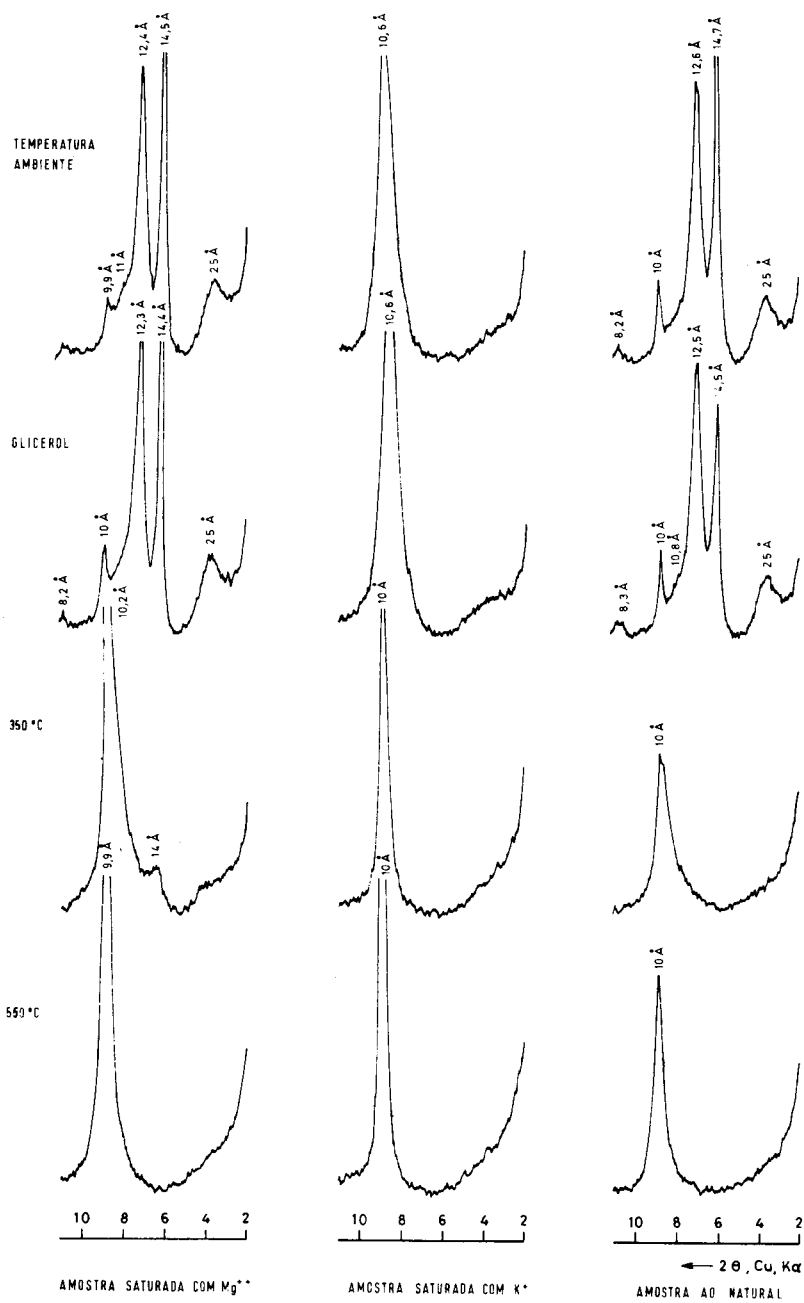


Fig. 1 – Diagramas de raios-X do padrão seleccionado de hidrobiotite + vermiculite, sujeito a diversos tratamentos.

Dentre os minerais argilosos, também se reconheceu de longa data, que os esmectitos são aqueles que exibem normalmente maior potencial de expansão. A influência da montmorilonite no fenómeno de expansão também já foi tratada por vários autores, envolvendo as propriedades electro-químicas à superfície dos cristais, teoria da dupla camada e sua correlação com o princípio da tensão efectiva [vidé, por exemplo, Lambe (1958a e b); Ladd (1960); Gillot (1968) e Horta da Silva (1969, 1971)].

Deste modo, sob o ponto de vista da composição granulométrica e mineralógica, poder-se-á afirmar que um solo será, potencialmente, tanto mais expansivo, quanto mais argiloso for e quanto maior quantidade de esmectitos tiver.

3.2 – No solo em discussão, quer a percentagem de argila quer a percentagem de montmorilonite são pequenas. A título de comparação, as expansões observadas para o presente solo, Fig. 4, corresponderiam nos dados publicados por Novais-Ferreira e Horta da Silva (1973) a percentagens de partículas argilosas superiores a 50%. A corroborar a discrepância de comportamento, realce-se ainda que a percentagem de montmorilonite na argila utilizada por estes autores varia entre 80% e 95% e que a quantidade de caulinite não ultrapassa 15%.

Evidentemente que, para além dos esmectitos existem outros minerais com rede cristalina expansiva capazes de adsorver água nas superfícies internas dos cristais, tais como vermiculite, hidrobiotite, halosite, ilite e clorite abertas, etc. Vários autores têm referido que, minerais deste tipo são susceptíveis de induzir um comportamento expansivo ao solo, Gillot (1968), Morgenstern (1969), Voïnovitch *et al* (1971), no entanto nenhum deles explica o mecanismo do fenómeno à luz dos princípios da mecânica dos solos.

De acordo com os dados referidos nos Quadros II e III, é fácil verificar que a expansão intracristalina das vermiculites, devido à adsorção de água, é mais limitada que a das montmorilonites. Tendo em conta os catiões de troca mais vulgares nas condições de ocorrência natural dos solos, C_a^{++} , M_g^{++} , N_a^+ e K^+ , verifica-se que, enquanto a montmorilonite saturada com os dois primeiros e dessecada à temperatura e humidade relativa ambiente exhibe expansões que vão da ordem dos 15 Å aos 19 Å, nas mesmas condições, a vermiculite-Ca expandirá aproximadamente de 15 Å a 15,4 Å e a vermiculite- M_g andará por 14,3 Å a 14,7 Å. No domínio dos catiões alcalinos enquanto que a montmorilonite-Na tem uma expansão ilimitada do tipo osmótico, a vermiculite-Na tem um comportamento que não anda longe daquele registado por os catiões divalentes. Por outro lado, com o potássio, para a montmorilonite, muito embora a expansão inter-lamelar seja difícil, é ainda

possível de 12,4 Å a 15 Å, enquanto que a vermiculite fecha completamente e não expande, sendo difícil de distinguir de uma biotite. Finalmente, só com o Li^+ , muito raro como catião de troca nas condições naturais, é que a vermiculite apresenta uma expansão ilimitada do tipo daquela que se observa com a montmorilonite-Na já acima referida, montmorilonite-Li e montmorilonite-H, Brown (1961), Norrish e Raussell-Colom (1963), Méring (1964).

A hidrobiotite, interestratificado regular 1/1 de camadas de biotite e vermiculite, terá, conseqüentemente, nas mesmas condições de saturação catiónica e teor de humidade, menor poder expansivo do que a vermiculite, provavelmente da ordem dos 50% daquele experimentado por este mineral*.

Muito embora não se tenham determinado os catiões de troca existentes no solo em discussão, os dados de difracção de raios-X e a.t.d. deixam prever que o material está predominantemente saturado com catiões divalentes, especialmente Mg^{++} e Ca^{++} . De facto, o reflexo (001) da montmorilonite** centrado a 15 Å e o reflexo (002) da vermiculite centrado a 14,7 Å, Fig. 1, assim deixam prever. A corroborar esta asserção verificou-se na Fig. 2 a existência de três picos, no intervalo 50° - 250° C, correspondentes a outras tantas fases de desidratação da vermiculite e hidrobiotite, o que de acordo com os dados apresentados por Mackenzie (1957) e Black (1965) deixa inferir a presença Mg^{++} e/ou Ca^{++} trocáveis.

Deste modo, sob o ponto de vista de expansão intracristalina, é de aceitar que nem a montmorilonite da fracção argilosa nem a vermiculite e hidrobiotite das fracções siltosa e arenosa existem nas condições de maior potencialidade expansiva.

3.3 - Analisando agora o problema em termos da mecânica dos solos e aceitando que as variações volumétricas são essencialmente controladas pelas variações da tensão na água dos poros do solo - tensão intersticial ou tensão neutra - e que esta tensão se pode decompor em três componentes principais (componente de adsorção, componente osmótico e componente capilar), Horta da Silva (1969 e 1971), verifica-se o seguinte:

- a) - quer a componente de adsorção quer a componente osmótica assumirão amplitudes de variação cada vez maiores na sequência hidrobiotite → vermiculite → montmorilonite;

* - Por outro lado as vermiculites interestratificadas com folhetos de montmorilonite (vermiculites em degradação) serão, potencialmente, mais expansivas do que a vermiculite propriamente dita.

** - Montmorilonite na fracção argilosa.

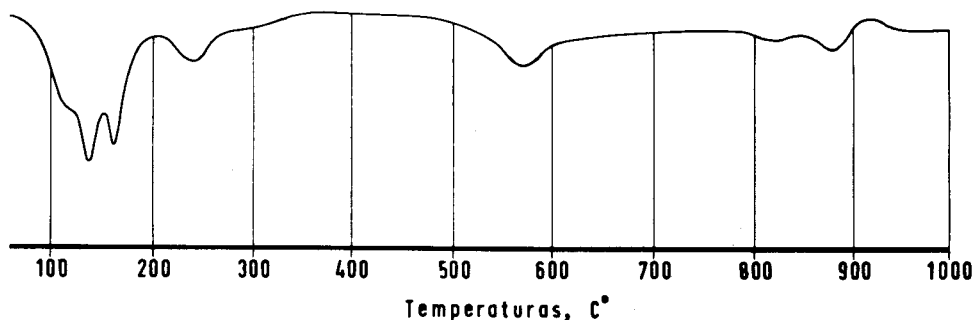


Fig. 2 - Diagrama de A.T.D. do padrão seleccionado (hidrobiotite + vermiculite)

b) - portanto, não só a fracção argilosa mas também as fracções siltosa e arenosa do solo contribuirão para as variações da tensão intersticial e consequentemente para o comportamento expansivo.

Tais ilações resultam do facto da hidrobiotite e vermiculite reterem nas condições naturais água interfoliar e desenvolverem, devido a elevada capacidade de troca, duplas camadas, que no estado de dessecação apresentarão deficiência de água, segundo o conceito de Lambe (1958a) e Ladd (1960). No entanto, as espessuras das duplas camadas para o caso da hidrobiotite e vermiculite, relativamente ao tamanho dos cristais, são menores do que as da montmorilonite.

A percentagem de água retida à superfície ou entre as folhas dos minerais, nas diversas fracções do solo e no padrão de hidrobiotite-vermiculite isolado, para amostras estabilizadas a 60% de humidade relativa, pode observar-se a partir das curvas de desidratação apresentadas na Fig. 3.

Verifica-se assim que, no solo total, a percentagem de argila determinada por sedimentação é manifestamente inferior à percentagem de minerais que se comportam como argila e que podem exhibir propriedades expansivas quer intracristalinas quer intercristalinas.

4 - OUTROS FACTORES QUE AFECTAM A EXPANSIBILIDADE

4.1 - No entanto, para além da composição dos solos, existem outros factores que afectam a percentagem de expansão, entre os quais se consideram de maior relevo:

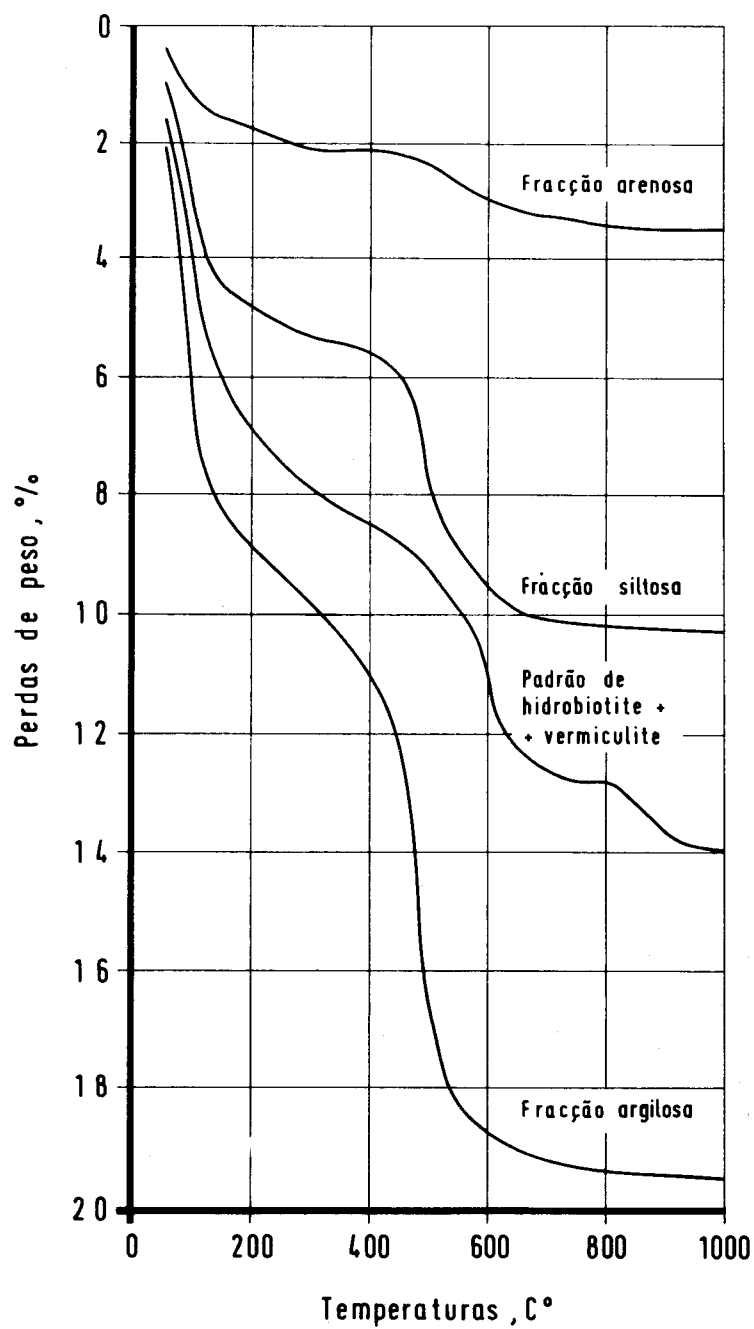


Fig. 3 - Curvas de A.T.G. da areia, silte, argila e padrão de hidrobiotite + vermiculite

- a) – condições de compactação: energia de compactação, teor de humidade e baridade seca;
- b) – natureza e concentração do líquido electrolítico;
- c) – papel do ar ocluso nos poros do solo e da componente de capilaridade;
- d) – orientação espacial das partículas do solo compactado (fábrica);
- e) – pressão de confinamento aplicada durante a expansão;
- f) – tempo permitido para a expansão.

Para o caso presente, tendo em conta que a pressão de confinamento que se opõe à expansão é, nos ensaios realizados no LEA, sempre a mesma*, que o líquido electrolítico utilizado é a água corrente** e que a percentagem de expansão é determinada quando se atinge a estabilização, fica-nos como de maior interesse para discussão, o papel desempenhado pelos factores a), c) e d).

4.2 – Na Fig. 4 apresentam-se exemplos de duas curvas de expansão em função do tempo, do solo compactado no molde CBR, com energias de compactação diferentes. Os estados iniciais dos provetes no que se refere à baridade seca (γ_d) e teor de humidade (w) são diferentes e referidos na própria figura. Como se pode verificar os resultados obtidos com o mesmo solo são completamente diferentes e estão de acordo com as ideias já referidas por outros autores, por exemplo Ladd (1960). Duma maneira geral, os solos expandem tanto mais quanto maior for a energia de compactação e baridade seca e quanto menor for o teor de humidade. Os dois primeiros factos estão, em parte, relacionados com a dissipação de energia e com a orientação preferencial dos minerais, e o terceiro com a deficiência de água nas duplas camadas dos minerais que se comportam como argila e com o papel do ar ocluso nos poros.

4.3 – Segundo os conhecimentos do autor, o papel desempenhado pelo ar ocluso nos poros do solo compactado e das tensões capilares, ainda não está bem conhecido. No entanto, é de admitir, de acordo com os dados apresentados por Ladd (1960) que, em certas condições, durante a embebição de um solo dessecado, o ar ocluso nos vazios de forma capilar aumenta rapidamente de tensão ao ser comprimido pelas forças de capilaridade. O aumento da tensão na fase gasosa produz forças

* – O valor da sobrecarga utilizada no ensaio de expansão é da ordem dos 7,98 Kg.

** – A natureza dos iões trocáveis e de sais solúveis no solo afectariam também a expansão, mas neste caso, não foram detectados sais solúveis, e o papel dos catiões trocáveis já foi discutido anteriormente.

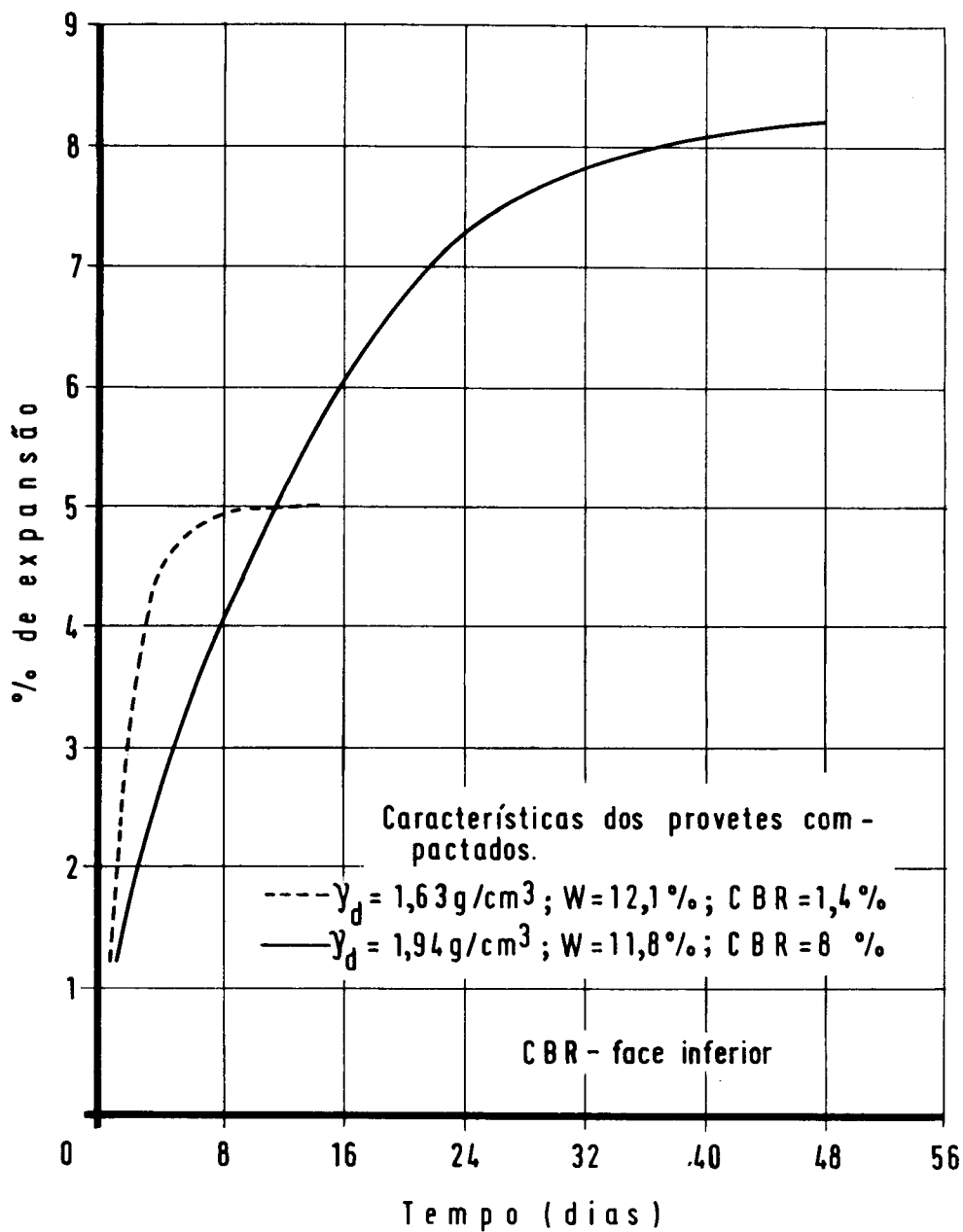


Fig. 4 – Curvas de expansão de um solo areno-siltoso com hidrobiotite, vermiculite e montmorilonite

tensores no esqueleto do solo obrigando-o a expandir. Neste caso, os materiais compactados a teores de humidade correspondentes ao ramo seco de curva de compactação são mais susceptíveis deste fenómeno do que os solos compactados para teores de humidade acima do óptimo.

4.4 – Finalmente resta analisar a influência da fábrica. Os conhecimentos que se têm sobre este domínio também não são vastos, não obstante constituírem no estado actual do conhecimento, preocupação da grande maioria dos centros de investigação dedicados aos problemas da mecânica dos solos [vidé, por exemplo Morgenstern (1969) e Horta da Silva (1973)]. Segundo Gillot (1968) seria de esperar que a orientação paralela dos minerais argilosos, relativamente uns aos outros, fábrica de tipo disperso, fosse potencialmente mais expansiva do que o arranjo espacial do tipo floculado, com os minerais argilosos orientados face com aresta. Este ponto de vista foi também admitido por Horta da Silva (1969), tendo então sugerido que, num solo com fábrica do tipo disperso o comportamento expansivo deve ser anisotrópico, atingindo valores máximos quando medido perpendicularmente à orientação dos minerais. Lambe (1958a) e Seed e Chan (1959) referem, ainda, que a compactação para valores de teor de humidade abaixo do óptimo conduz a fábricas do tipo floculado que se orientam à medida que o teor de humidade sobe atingindo o máximo de orientação para teores de humidade acima do óptimo. Mais recentemente, Samlley e Cabrera (1969) mostraram que a compactação pode produzir fábricas duma maneira geral desordenadas mas, localmente, compostas de agregados altamente orientados, com os minerais dispostos como as folhas de um livro.

Nas Figs. 5 e 6 apresentam-se alguns aspectos do arranjo espacial das partículas do solo estudado, quando compactado para teores de humidade abaixo do óptimo, vistos ao microscópio electrónico tipo “estereoscan”. A fábrica do material compactado aproxima-se do modelo descrito por Samlley e Cabrera (1969). Existe um estado de desordem geral, mas há, nitidamente, orientação preferencial de certas camadas dispostas normalmente à direcção de compactação. Dentro das camadas sobressaiem ainda agregados com os minerais dispostos paralelamente como as folhas de um livro.

É bem conhecido dos mineralogistas de argilas que utilizam técnicas de difracção de raios-X que, a compactação do material argiloso para a análise difractométrica, conduz a uma orientação preferencial dos filossilicatos, segundo os planos estruturais (00 l), perpendicularmente à direcção de compactação.

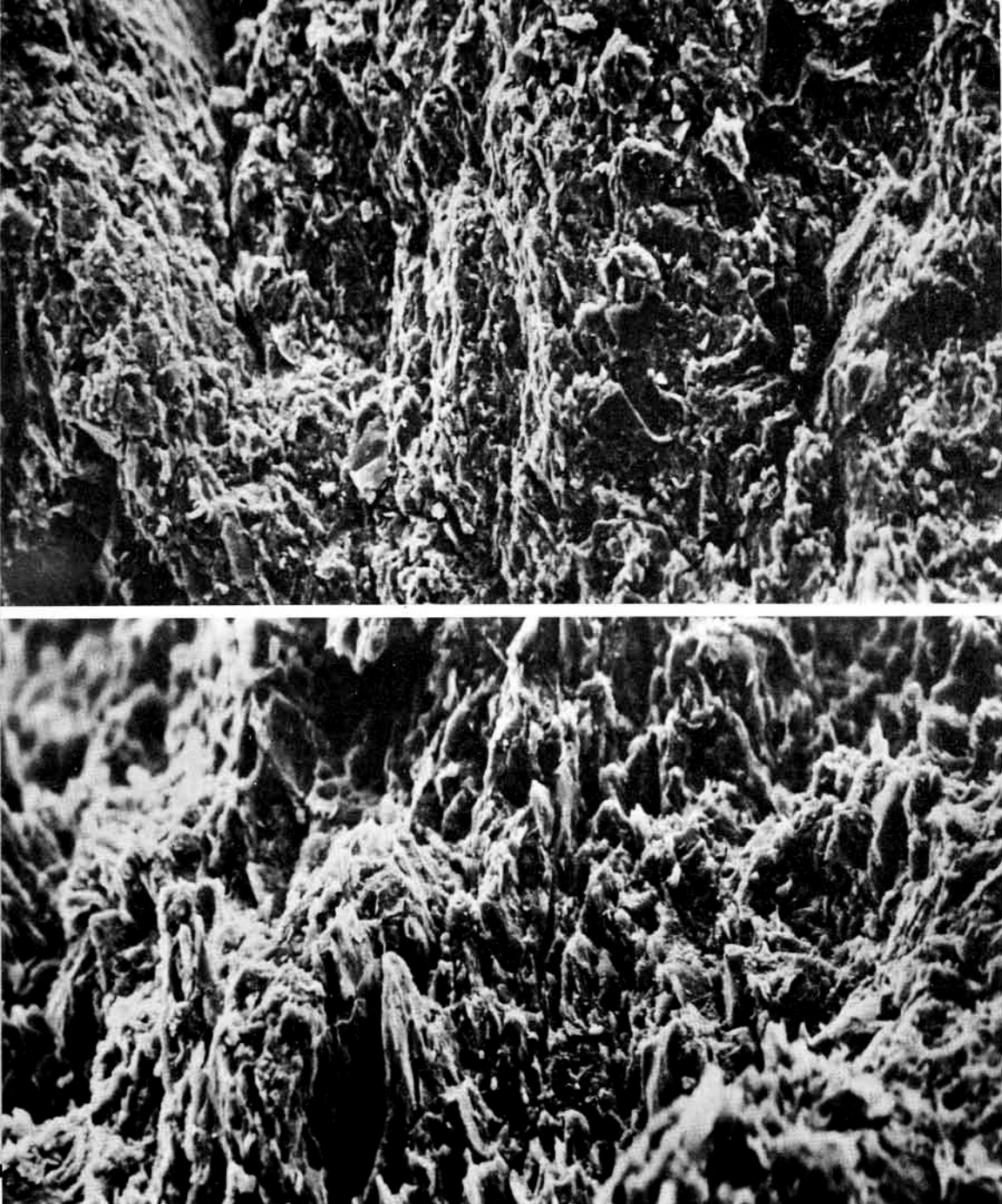


Fig. 5 – Aspectos da fábrica do solo hidrobiotítico-vermiculítico compactado, vistos ao microscópio electrónico, tipo "estereoscan". Notar a existência de algumas camadas com os minerais orientados, enquanto que noutras áreas se verifica um estado de empilhamento desordenado.

Escalas: em cima $\overline{\hspace{1.5cm}} 400 \mu \hspace{0.5cm}$; em baixo $\overline{\hspace{1.5cm}} 200 \mu \hspace{0.5cm}$



Fig. 6 – Aspecto da fábrica do solo hidrobiotítico-vermiculítico compactado, visto ao microscópio electrónico, tipo “estereoscan”. Notar a existência de agregados com os minerais orientados como as folhas de um livro, no seio de material caoticamente distribuido

Escala: $\overbrace{\hspace{1.5cm}}^{40\ \mu}$

Deste modo, é de inferir que para um mesmo teor de humidade, o aumento de energia de compactação conduza não só a um maior adensamento, mas também a um maior grau de orientação dos minerais filitosos. Do facto resultará que em solos do tipo micácio, mormente no caso da presença de minerais vermiculíticos, o aumento de energia de compactação induzirá progressivamente um comporta-

mento cada vez mais expansivo e anisotrópico, uma vez que as forças de repulsão entre as partículas são maiores, quando estas estão orientadas face com face, do que face com aresta.

Resta saber como é que estes minerais se orientarão durante a compactação à medida que se faz variar o teor de humidade, o que se espera realizar futuramente.

4.5 – Para terminar, não deixa de ser oportuno referir que Terzaghi (1931) conseguiu duplicar a compressibilidade e a expansão de várias argilas, utilizando misturas apropriadas de areia e palhetas de mica, Morgenstern (1969). Dados idênticos foram ainda obtidos por Lambe (1958b). Em complemento dos fenómenos de expansão intra e inter-cristalinos ligados às propriedades electro-químicas à superfície dos cristais, é ainda de admitir que em solos compostos por palhetas do tipo micácio, deformações puramente mecânicas do tipo elástico possam desempenhar um papel importante no comportamento expansivo.

6 – CONCLUSÕES

Dos estudos efectuados e da discussão que se proporcionou, conclui-se:

- a) – O solo estudado é potencialmente expansivo, não só devido à presença de montmorilonite na fracção argilosa, mas também devido à presença de vermiculite e hidrobiotite nas fracções siltosa e arenosa;
- b) – em solos deste tipo, nos quais as fracções grosseiras contribuem para a expansão, a utilização de correlações com base no índice de plasticidade e percentagem de argila, para inferir potencialidades de expansão, pode conduzir a interpretações erradas;
- c) – a influência da vermiculite e hidrobiotite no fenómeno de expansão pode ser interpretado, como no caso das montmorilonites, à base das propriedades electro-químicas à superfície dos cristais, em termos das componentes da tensão intersticial; no entanto é ainda possível que se verifique certa contribuição resultante de deformações puramente mecânicas, do tipo elástico;
- d) – o material compactado no ramo seco da curva de compactação, visto ao microscópio electrónico, mostra uma fábrica duma maneira geral desordenada, localmente, com camadas onde existe nítida

orientação preferencial dispostas perpendicularmente à direcção de compactação; localmente são ainda visíveis agregados com os minerais dispostos paralelamente como as folhas de um livro;

- e) – as condições de compactação afectam drasticamente o comportamento do solo. De facto o simples decréscimo da baridade seca de $1,94 \text{ g/cm}^3$ para $1,63 \text{ g/cm}^3$ a que correspondem teores de humidade de 11,8% e 12,1%, devido à redução da energia de compactação, foi o suficiente para diminuir a percentagem de expansão de cerca de 50%; o aumento da energia de compactação deve ter contribuído não só para o adensamento do solo, mas também para a orientação preferencial da hidrobiotite e vermiculite, o que aumenta a potencialidade de expansão;
- f) – a contribuição de outros factores é ainda possível, tais como tensões que se geram no ar ocluso em alguns poros e a expansão global do solo dependerá da amplitude e interacção dos vários factores intervenientes.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Dr. MacHardy do Instituto Macaulay for Soil Research de Aberdeen (Escócia) pela colaboração prestada no estudo da fábrica ao microscópio electrónico. Os agradecimentos são ainda extensivos ao Eng.^o Novais-Ferreira director do LEA e ao colega Dr. Celso F. Gomes da Direcção dos Serviços de Geologia e Minas, pela revisão e crítica do presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 11 – BLACK, C. A. (1965) – “Methods of soil analysis (Part I)” – American Society of Agronomy, Inc, Madison, Wisconsin.
- 2 – BROWN (1961) – “The X – ray identification and crystal structures of clay minerals” – Mineralogical Society, London.
- 3 – FIGUEIREDO GOMES, C. (1970) – “Alteração Biotite-Caulinite” – Boletim dos Serviços de Geologia e Minas, N.º 22, Luanda.
- 4 – GILLOT, J. E. (1968) – “Clay in engineering geology”. Elsevier Publishing Company, Amsterdam, London, New York.

- 5 - HORTA DA SILVA, J. A. (1968) - "Relatório do estágio efectuado no Instituto Macaulay; 3.º Trimestre" LEA, Luanda.
- 6 - HORTA DA SILVA, J. A. (1969) - "Geology and engineering behaviour of expansive and collapsing soils from Angola" - MSC thesis, Imperial College of Science and Technology, London.
- 7 - HORTA DA SILVA, J. A. (1971) - "Geology and engineering behaviour of expansive and collapsing soils from Cazenga region" - 5th Regional Conf. on Soil Mech. and Found. Engineering, Luanda.
- 8 - HORTA DA SILVA, J. A. (1973) - "Visita efectuada ao Instituto Macaulay (Aberdeen), Laboratoire de Sédimentologie e Géochimie de la Surface (Strasbourg), Imperial College (London) e Laboratoire des Ponts et Chaussées (Paris) - LEA - Rel., Luanda.
- 9 - LADD, C. C. (1960) - "Mechanisms of swelling by compacted clay"- Highway Research Board Bulletin, n.º 245.
- 10 - LAMBE, W. (1958 a) - "The structure of compacted clay" - Journal of Soil Mechanics and Found. Division" Vol. 84, SM2.
- 11 - LAMBE, W. (1958 b) - "The Engineering behaviour of compacted clay" - Journal of Soil Mechanics and Found. Division" Vol. 84, SM2.
- 12 - MACKENZIE, R. C. (1957) - "The differential thermal investigation of clays" - Mineralogical Society, London.
- 13 - MÉRING, J. (1964) - "Gonflement, dispersion et hydratation des argiles" - Bulletin du Groupe Français des Argiles, Tme XIV, Ser. 9.
- 14 - MORGENSTERM, N. R. (1969) - "Structural and physico-chemical effects on the properties of clays" - 1th Int. Conf. On Soil Mech. and Found. Engineering, Especial Sessions, México.
- 15 - NORRISH, K. e RAUSSEL-COLOM, J. A. (1963) - "Low-angle X-ray diffraction studies of the swelling of montmorillonite and vermiculite", - Clays and Clay Minerals 10th Conf., Austin.
- 16 - NOVAIS-FERREIRA, H. e HORTA DA SILVA, J. A. (1973) - "Note on expansive soils, their recognition and the forecasting of their behaviour", - 8th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engineering, Moscow.
- 17 - SAMLEY, I. J. e CABRERA, J. G. (1969) - "Particle association in compacted Kaolin" - Nature, n.º 222.
- 18 - SEED, H. B. e CHAN, C. K. (1959) - "Structure and strength characteristics of compacted clay" - Journ. Soil. Mechanics Found. Division, Vol. 85, SM5.
- 19 - TERZAGHI, K. (1931) - "Influence of elasticity and permeability on the swelling of two-phase systems", in "Colloidal Chemistry" ed. by Alexander, Vol. 3.
- 20 - VAN DER MERWE, D. H. (1964) - "The prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fraction of Soils", - The Civil Engineer in South Africa, n.º 6.
- 21 - VOÏNOVITCH, I. A. *et al.* (1971) - "L'analyse mineralogique des sols argileux" - Éditions Eyrolles, Paris.
- 22 - WILSON, M. J. (1970) - "A study of weathering in a soil derived from a biotite-hornblende rock, I - Weathering of biotite" - Clay minerals, Vol. 8.