

# NOTA SOBRE A INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA E CARACTERÍSTICAS DE COMPACTAÇÃO NO COMPORTAMENTO EXPANSIVO DE UM SOLO\*

On the influence of the mineral composition and compaction characteristics of a soil on its swelling

por

J. A. HORTA DA SILVA\*\* e A. SANTOS NUNES\*\*\*

RESUMO – No decurso do estudo geotécnico preliminar da futura estrada Maria Tereza-Salazar, foi detectada a ocorrência de um solo com comportamento altamente expansivo, quando sujeito a compactação pesada. Nesta nota apresenta-se um estudo detalhado da composição do solo e discute-se o seu comportamento expansivo em termos da influência da mineralogia e características de compactação.

SYNOPSIS – During the preliminary geotechnical study of the future road Maria Tereza-Salazar, the occurrence of a soil, which undergoes a highly expansive behaviour when subjected to heavy compaction, has been found. In this note, a detailed study of the soil composition is presented and a discussion is provided on the influence of the mineralogy and compaction characteristics upon its swelling behaviour.

## 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Durante a fase de estudo geotécnico preliminar da futura estrada que ligará Maria Tereza a Salazar, levado a efeito pela Junta Autónoma de Estradas de Angola, foi encontrado ao km 26,9 do trecho Maria Tereza-Cachilo um solo

---

\* Manuscrito recebido em Julho 1974. A discussão do trabalho está aberta durante um período de três meses.

\*\* Geólogo especialista. Chefe da Divisão de Solos e Rochas do L.E.A. (1974). Actualmente técnico principal do Gabinete da Área de Sines.

\*\*\* Geólogo do L.E.A. (1974). Actualmente professor do Liceu de Vizeu.

que apresenta um comportamento altamente expansivo, depois de compactado em molde C.B.R..

Segundo os dados da J.A.E.A., que enviou ao L.E.A. duas amostras do solo para estudo mineralógico, a percentagem de expansão do material compactado sensivelmente ao óptimo da compactação pesada era 23,5% para uma sobrecarga de 10 libras (4,536 kg) e 12,7% para uma sobrecarga de 20 libras (9,072 kg), Quadro I.

No Laboratório de Engenharia de Angola procedeu-se ao estudo mineralógico acima referido e analisou-se ainda a influência das condições de compactação no comportamento expansivo do solo compactado.

No Quadro I estão resumidos os resultados dos ensaios de identificação geotécnica, de compactação e expansão levados a efeito no L.E.A., reproduzindo-se ainda no mesmo quadro, como termo de comparação, os dados obtidos pela Junta Autónoma de Estradas de Angola.

Trata-se de um solo com textura argilosa,\* do tipo CH-MH (Classificação Unificada) ou A-7-5 (Classificação AASHO).

1.2 – Nesta nota apresentam-se e discutem-se os dados obtidos, mostrando-se como a composição do solo e as condições de compactação podem afectar a expansão.

## 2 – COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

A análise mineralógica do solo incidiu sobre a amostra global e respectivas fracções arenosa ( $> 74\mu$ ), siltosa ( $74-2\mu$ ) e argilosa ( $< 2\mu$ ) recorrendo-se às técnicas de difracção de raios-X e análises térmicas diferencial (A.T.D.) e ponderal (A.T.G.).

Em difracção de raios-X utilizou-se uma instalação Philips trabalhando com radiação  $K\alpha$  do  $Co$ , contador proporcional e discriminador incorporado, em A.T.D., um aparelho Deltatherm com 4 canais e termopares de platina-ródio e alumel-cromel e em A.T.G., uma termobalança Stanton-H.T.-D sensível ao decimilograma com termopar de platina-ródio.

Nas análises quantitativas efectuadas, as amostras foram saturadas com  $Ca^{++}$  e  $Na^+$ , respectivamente, para difractometria de raios-X, em que se seguiu o método do padrão interno com utilização da bohemite, e análises térmicas.

---

\* Classificação textural de acordo com o diagrama triangular da Public Roadss Administration System.

**QUADRO I**  
**RESULTADOS DOS ENSAIOS GEOTÉCNICOS**

ENSAIOS		NÚMERO DAS AMOSTRAS				
		L.E.A. N.º 51155		L.E.A. N.º 51156		J.A.E.A. N.º 11 Perfil 106
Cor Munsell	Seco	Amarelo avermelhado 7,5 Y R 6/8		Amarelo avermelhado 7,5 Y R 6/8		—
	Molhado	Vermelho amarelado 5 Y R 5/8		Vermelho amarelado 5 Y R 5/8		—
Granulometria (%)	Penetração	Pen. 3/8"	100,0	100,0	—	
		Pen. 4	98,9	99,7	—	
		Pen. 10	98,0	99,2	100,0	
		Pen. 40	93,9	95,5	91,9	
		Pen. 200	85,6	87,6	81,3	
	Sedimentação	≤ 5 $\mu$	41,0	44,0	—	
≤ 2 $\mu$		34,0	37,0	—		
Consistência (%)	Lim. liquidez – WL		70,0	67,0	62,0	
	Lim. plasticidade – W <sub>p</sub>		33,0	32,0	38,0	
	Lim. retracção – W <sub>s</sub>		16,4	17,5	—	
	Ind. plasticidade – I <sub>p</sub>		37,0	35,0	24,0	
	Ind. retracção – I <sub>s</sub>		53,6	49,5	—	
Classificação	Textural		Argila	Argila	—	
	Unificada		CH	CH	MH	
	A.A.S.H.O.		A-7-5 (20)	A-7-5 (20)	A-7-5 (18)	
Compactação (óptimo)		Normal	$\gamma_d=1,41\text{g/cm}^3$	$W_o=30,0\%$	—	—
		Pesada	$\gamma_d=1,67\text{g/cm}^3$	$W_o=20,1\%$	$\gamma_d=1,67\text{g/cm}^3$	$W_o=20,4\%$
Expansão aos Teores Óptimos	Aos 4 dias	% de expansão	Normal	2,50*		—
			Pesada	6,30*		—
		Tensão de expansão	Normal	0,25 kg/cm <sup>2</sup>		—
			Pesada	4,10 kg/cm <sup>2</sup>		—
	Máxima	% de expansão	Normal	4,52*		—
			Pesada	18,02*		12,70** 23,50***
		Tensão de expansão	Normal	0,30 kg/cm <sup>2</sup>		—
			Pesada	8,04 kg/cm <sup>2</sup>		—
Expansão a $\gamma_d = 1,65$	Ramo seco	% expans.	22,24		—	
		Tens. exp.	8,72 kg/cm <sup>2</sup>		—	
	Ramo húmido	% expans.	14,62		—	
		Tens. exp.	5,78 kg/cm <sup>2</sup>		—	

\* - Sobrecarga de 15 Lb (6,802 kg)

\*\* - Sobrecarga de 20 Lb (9,072 kg)

\*\*\* - Sobrecarga de 10 Lb (4,536 kg)

QUADRO II  
RESULTADOS DA ANÁLISE MINERALÓGICA

MINERAIS IDENTIFICADOS		PERCENTAGENS
Essenciais	Beidelite ferrífera-Nontronite	49
	Caulinite	25
	Goethite	9
	Quartzo	6
Acessórios	Vermiculite	Cerca de 11
	Interestratificados (vestígios)	
	Clorite (vestígios)	
	Hematite	
	Plagioclase sódica	
	Anfíbola (vestígios)	

Os resultados das análises revelaram uma perfeita identidade de composição mineralógica das amostras, apresentando-se no Quadro II os resultados globais da mineralogia qualitativa e quantitativa do solo.

Este é essencialmente constituído por minerais argilosos presentes numa percentagem de cerca de 74%, destacando-se um mineral do grupo das esmectites dioctaédricas (série beidelite ferrífera-nontronite) e um do grupo da caulinite (caulinite desordenada); ocorrem ainda muito pequenas quantidades ou vestígios de vermiculite, clorite e vários interestratificados com camadas de clorite, vermiculite e montmorilonite. Como minerais não argilosos ocorrem pequenas percentagens de hematite, goethite, quartzo, plagioclase sódica e vestígios de um mineral do grupo das anfíbulas.

Na Fig. 1 apresentam-se as curvas de A.T.D. e A.T.G. do solo global e da sua fracção <2 $\mu$ .

Não foi possível determinar, por via química, a natureza dos catiões de troca adsorvidos na amostra, mas pelo tipo das curvas de análise térmica diferencial e diferencial termogravimétrica e pelo reflexo (001) da montmorilonite estreito e centrado a 14,7Å tudo leva a crer que predominem os catiões divalentes, muito provavelmente  $Ca^{++}$  e  $Mg^{++}$ .

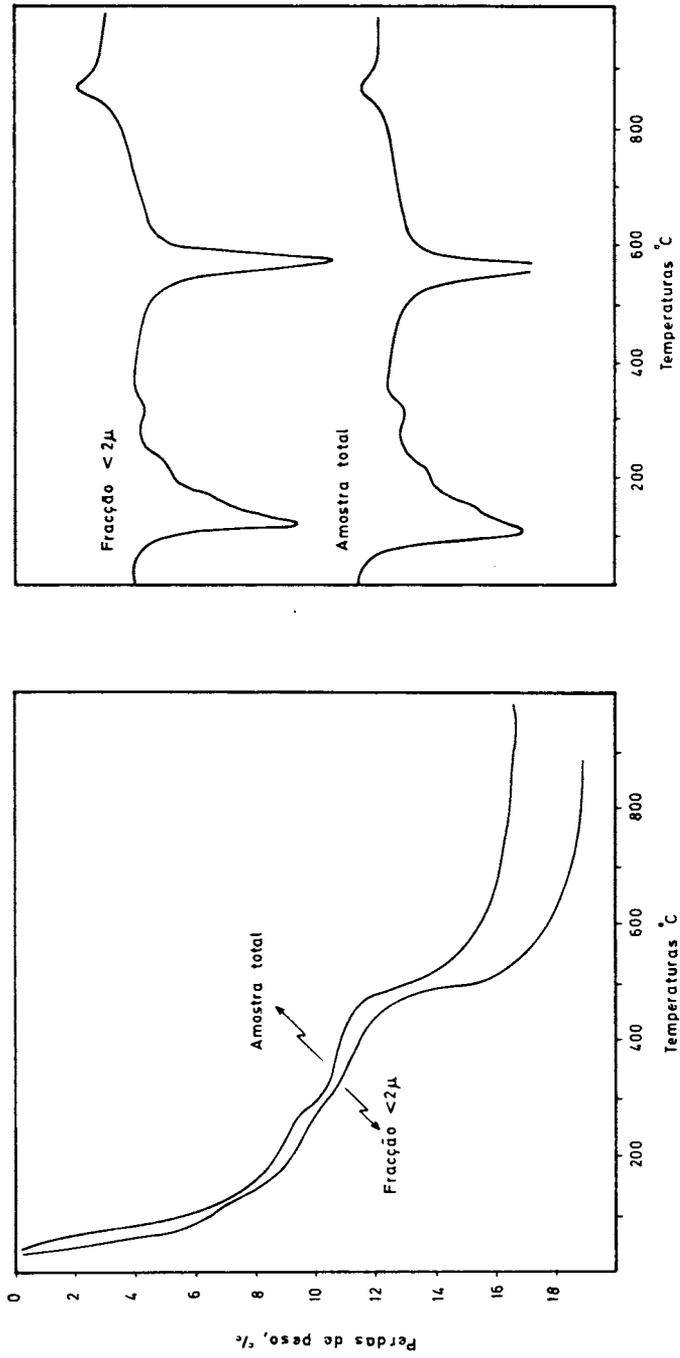


Fig. 1 - Curvas de perda de peso e de análise térmica diferencial da amostra total e da fracção <math><2\mu</math> estabilizadas a 50% de humidade.

### 3 – COMPACTAÇÃO E EXPANSÃO

Os ensaios de compactação foram efectuados de acordo com as normas AASHO T-99 (compactação normal) e AASHO T-180 (compactação pesada) e a medição das percentagens e tensões de expansão foram efectuadas com o solo compactado no molde CBR. Na compactação normal utilizou-se a energia específica de 6015 gr.cm/cm<sup>3</sup> e na pesada a energia de 27 339 gr.cm/cm<sup>3</sup>.

O estudo da expansão fez-se unidimensionalmente, na mesma direcção em que a energia de compactação actuou, mas em sentido oposto. Para medir a percentagem

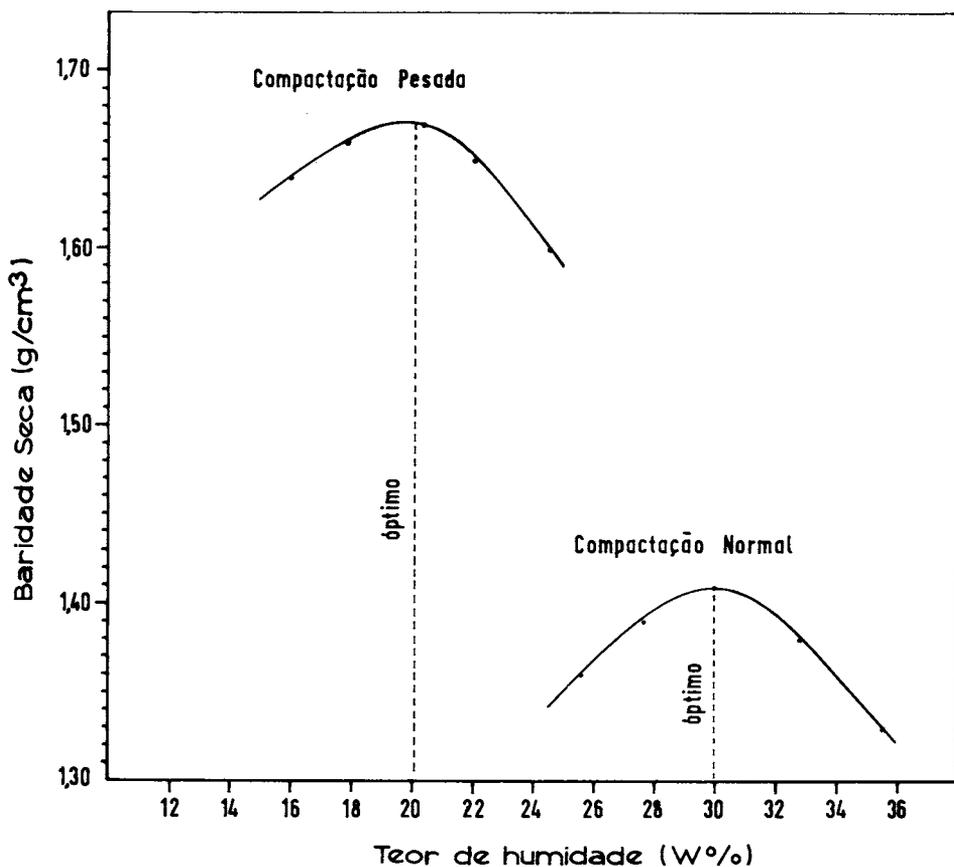


Fig. 2 – Curvas de compactação de uma das amostras

de expansão utilizou-se um deflectómetro montado no molde CBR, ficando o solo sujeito a uma sobrecarga de 15 libras (6,804 kg) e a tensão de expansão foi determinada, a volume constante, por intermédio de um anel dinamométrico montado numa estrutura especial a que se fixa o molde CBR.

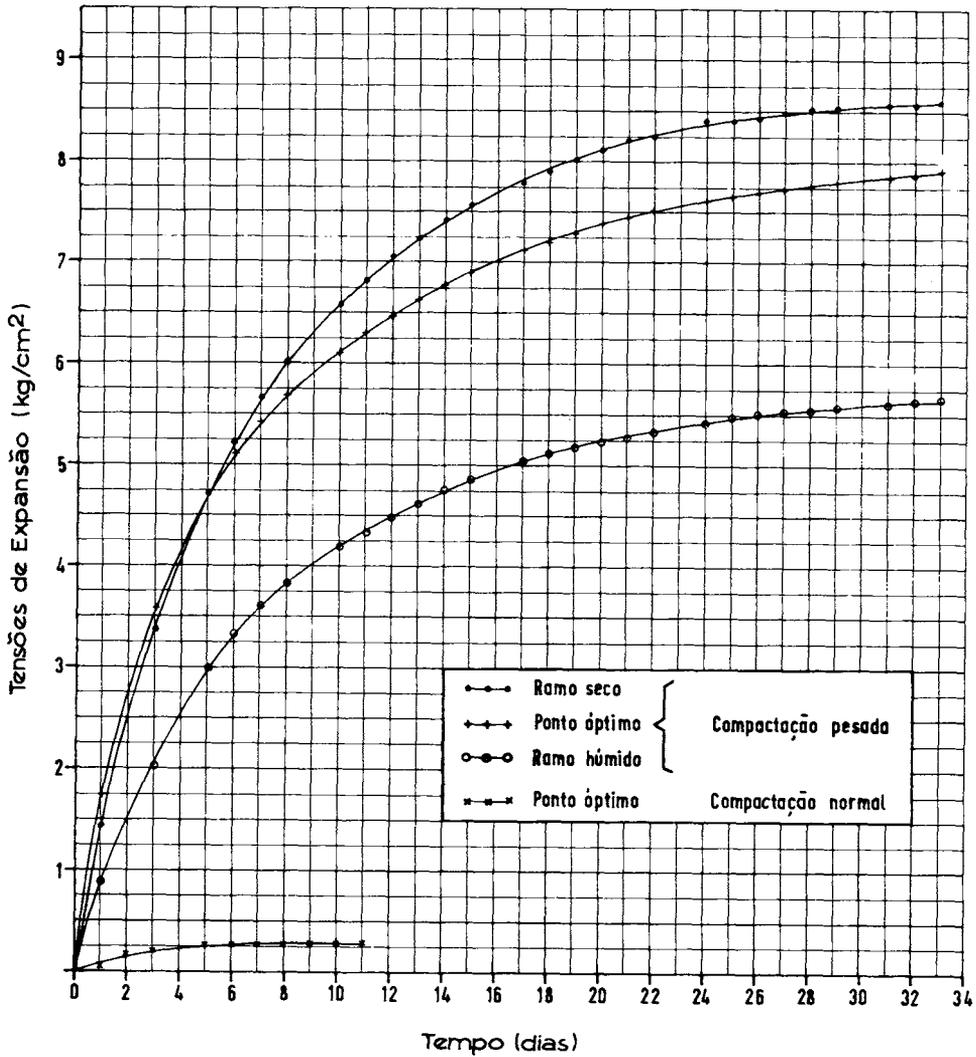


Fig. 3 – Curvas de variação da tensão de expansão com o tempo

O acesso de água às amostras fez-se pelas partes superior e inferior dos moldes submersos num tanque de água. O solo foi deixado expandir até à estabilização.

Os ensaios realizados foram levados a efeito com o solo compactado aos pontos "óptimos" das curvas de compactação normal e pesada e a teores de humidade correspondentes aos ramos seco e húmido da curva de compactação pesada.

As curvas de compactação normal e pesada obtidas estão representadas na Fig. 2 e os resultados dos ensaios de expansão estão reproduzidos no Quadro I e na Fig. 3. Nesta figura apresentam-se as curvas de variação da tensão de expansão com o tempo.

De acordo com os dados obtidos o solo apresenta teores óptimos de humidade respectivamente de 30,0% e 20,1% a que correspondem baridades secas\* de 1,41 e 1,67 gr./cm<sup>3</sup> para ensaios de compactação normal e pesada.

O solo compactado ao óptimo da compactação normal expandiu cerca de 4,52% e ao óptimo da compactação pesada 18,02% a que correspondem tensões de expansão da ordem dos 0,30 kg/cm<sup>2</sup> e 8,04 kg/cm<sup>2</sup>. Por outro lado, os valores da expansão do solo compactado nos ramos seco e húmido da curva de compactação pesada à baridade de 1,64-1,65 gr/cm<sup>3</sup> deram respectivamente expansões de 22,24% e tensões de expansão de 8,72 kg/cm<sup>2</sup> (ramo seco) e expansões de 14,62% e tensões de expansão 5,78 kg/cm<sup>2</sup> (ramo húmido).

#### 4 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

4.1 – A análise dos resultados obtidos revela logo, à primeira vista, que existe uma grande discrepância entre a percentagem de partículas argilosas <2 $\mu$  determinada por sedimentação e a percentagem de minerais argilosos determinados por difracção de raios-X, A.T.D. e A.T.G.. De facto a percentagem de partículas argilosas da ordem dos 34 a 37% é manifestamente baixa em relação com a percentagem de montmorilonite e caulinite que anda por volta dos 74%.

Este facto deve-se à agregação do material argiloso, em parte, possivelmente relacionada com a acção de cimentação ocasionada pelos óxidos e hidróxidos de ferro. Os agregados de minerais argilosos não são totalmente desfeitos durante

---

\* Baridade seca ou densidade aparente seca.

a preparação das suspensões para a análise de granulometria por sedimentação comportando-se, granulometricamente, como silte e provavelmente até como areia.

A corroborar esta asserção temos ainda o facto dos limites de liquidez e de plasticidade em relação com a percentagem de partículas argilosas determinadas serem mais elevados do que os limites de liquidez e de plasticidade de misturas artificiais de montmorilonite beidelítica e quartzo obtidas no LEA para partículas de argila variando entre 34 e 37% (vide Horta da Silva *et al.*, 1971 e Horta da Silva, 1973a).

A pequena percentagem de partículas argilosas determinada também não é consentânea com os dados de expansão obtidos. Na verdade se o material activo em produzir expansibilidade estivesse somente localizado nos 34 a 37% de partículas  $<2\mu$  determinadas, não seriam de prever percentagens e tensões de expansão tão elevadas como as obtidas, tendo em conta o tipo de montmorilonite presente nas amostras e a natureza dos catiões adsorvidos.

O fenómeno da agregação é corrente nos solos, e tem sido demonstrado por vários autores como Lambe e Martin (1957), Dumbleton e West (1966), Horta da Silva (1969, 1973a e 1973b) recorrendo a análises mineralógicas e de granulometria por sedimentação. Não obstante este facto, continua ainda a ser muitas vezes ignorado, o que leva a conclusões erradas, quando as interpretações se fazem somente com base na composição granulométrica.

Percentagens de montmorilonite da ordem dos 50% na amostra total justificam, porém, o comportamento do solo.

Os minerais montmoriloníticos têm elevada superfície específica e elevada capacidade de troca catiónica desenvolvendo, quando saturados, espessas duplas camadas em relação com o tamanho dos cristais. Deste modo a componente osmótica da tensão intersticial apresenta grandes amplitudes durante a secagem e humedecimento do material em função da deficiência de água nas duplas camadas. Por outro lado, as montmorilonites apresentam ainda variações na dimensão da célula unitária com o teor de água adsorvida. Os espaçamentos basais para espécies saturadas com catiões divalentes (ex.  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ) pode oscilar de 14-15 Å, para o material dessecado, até cerca de 19 Å-20 Å para o material saturado. Quer o fenómeno de expansão intracristalina quer o aumento de espessura das duplas camadas durante a adsorção de água provocam forças de repulsão entre os cristais originando expansão intercristalina e o inchamento do solo.

No entanto há outros factores que contribuem para o fenómeno de expansão dum solo e portanto nem só a sua composição é responsável pelo comportamento

da variação volumétrica vide, por exemplo, Ladd (1960), Donaldson (1969), Horta da Silva (1973b, 1973c).

4.2 – Os ensaios de expansibilidade realizados com o solo compactado em diferentes condições mostram, de forma evidente, a influência da energia de compactação e do teor de humidade das terras a compactar na % de expansão e nas tensões de expansão observadas por embebição das amostras.

Em primeiro lugar verifica-se que, o mesmo solo, se torna, potencialmente, mais expansivo à medida que a energia de compactação aumenta o que em termos de adensamento significa menor teor de humidade e maior baridade seca, Fig. 2. Por exemplo a tensão máxima de expansão medida no material compactado ao óptimo da compactação normal ( $\gamma_d = 1,41 \text{ gr/cm}^3$ ;  $W = 30\%$ ) é de  $0,30 \text{ kg/cm}^2$  e no material compactado ao óptimo da compactação pesada ( $\gamma_d = 1,67 \text{ gr/cm}^3$ ;  $W\% = 20,1\%$ ) é de  $8,04 \text{ kg/cm}^2$ . As condições de compactação transformaram por completo o comportamento do solo que era fracamente expansivo, quando sujeito a compactação normal, para se tornar altamente expansivo quando sujeito a compactação pesada, Fig. 3.

Por outro lado, para a mesma energia de compactação, verifica-se que o solo tem um comportamento expansivo mais acentuado quando compactado no ramo seco do que quando compactado no ramo húmido. Os valores da tensão máxima de expansão obtidos utilizando a energia correspondente à compactação pesada mostraram que a tensão de expansão no ramo seco ( $\gamma_d = 1,65 \text{ gr/cm}^3$  e  $W\% = 18,2$ ) deu  $8,72 \text{ kg}$  enquanto no ramo húmido a mesma baridade ( $\gamma_d = 1,65 \text{ gr/cm}^3$  e  $W\% = 22,4$ ) deu  $5,78 \text{ kg/cm}^2$ , Fig. 3.

O aumento de energia de compactação aumenta a baridade seca do solo compactado e conseqüentemente aumenta a energia armazenada no esqueleto sólido da amostra deformando elasticamente os minerais filitosos. Durante a expansão esta energia tenderá a dissipar-se contribuindo para uma maior instabilidade volumétrica. O aumento de energia de compactação obriga ainda a baixar o teor de humidade do solo e, deste modo, a deficiência de água nas duplas camadas dos minerais expansivos aumenta\* pelo que a quantidade de água a ser adsorvida durante a embebição também aumentará induzindo uma maior instabilidade volumétrica.

O diferente comportamento que se observa no ramo húmido e seco, para solos compactados com a mesma energia está ainda dependente da deficiência de água

---

\* Ou por outras palavras, a componente osmótica da tensão intersticial aumenta em módulo.

nas duplas camadas dos minerais expansivos. Amostras compactadas à mesma baridade seca no ramo húmido e seco da curva de compactação terão forçosamente de apresentar comportamentos diferentes pois que as deficiências de água nas duplas camadas dos minerais argilosos compactados no ramo seco serão maiores do que as deficiências de água nas duplas camadas dos minerais argilosos compactados acima do óptimo. A tensão intersticial negativa é maior no ramo seco do que no ramo húmido e durante o encharcamento a recuperação da tensão intersticial será maior para os materiais compactados abaixo do óptimo do que para os materiais compactados acima do óptimo e portanto os solos compactados no ramo seco expandirão mais.

Adicionalmente entrarão ainda em jogo as expansões da rede cristalina das montmorilonites, especialmente quando o solo é compactado a teores de humidade abaixo do óptimo.

## 5 – CONCLUSÕES

5.1 – O solo é potencialmente expansivo por conter elevadas percentagens de minerais de rede cristalina expansiva, nomeadamente montmorilonite, da série beidelite ferrífera-nontronite, em proporções que andam por cerca de 49% do solo total.

A percentagem de montmorilonite está em contradição com a percentagem de partículas  $<2\mu$  determinadas por sedimentação, supondo-se que este facto seja devido a agregação de material argiloso que granulometricamente se comporta como silte e até areia.

5.2 – A montmorilonite sob a forma de agregados contribui, no entanto, para a expansão do solo, pelo que o comportamento do solo é mais consentâneo com a composição mineralógica do que com a composição granulométrica determinada.

5.3 – A compactação afecta ainda drasticamente a expansão. Enquanto que o material compactado ao óptimo da normal dá tensões de expansão da ordem dos  $0,30\text{ kg/cm}^2$  o mesmo material compactado ao óptimo da compactação pesada dá valores da ordem dos  $8,04\text{ kg/cm}^2$ .

5.4 – O solo apresenta maior expansão quando compactado abaixo do teor óptimo de humidade do que quando compactado acima do óptimo. Para a mesma energia de

compactação e baridade de  $1,65 \text{ gr/cm}^3$  (compactação pesada) verificaram-se tensões máximas de expansão da ordem dos  $8,72 \text{ kg/cm}^2$  e  $5,78 \text{ kg/cm}^2$  respectivamente para o ramo seco e húmido da curva de compactação.

5.5 – A influência das características de compactação no comportamento expansivo prende-se essencialmente com o problema da variação da componente osmótica da tensão intersticial relacionada com a deficiência de água nas duplas camadas dos minerais argilosos, arranjos estruturais das partículas do solo que induzem deformações elásticas e expansão intracristalina da montmorilonite.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 – DONALDSON, G. W. (1969) – *The occurrence of problems of heave and the factors affecting its nature* – 2nd International Conference on Expansive Soils, Houston, U.S.A.
- 2 – DUMBLETON, M. J. e WEST, G. (1966) – *Some factors affecting the relation between the clay minerals in soils and their plasticity* – Clay Minerals, Vol. 6.
- 3 – HORTA DA SILVA, J. A. (1969) – *Geology and engineering behaviour of expansive and collapsing soils of Angola* – Dissertation, Imperial College of Science and Technology, London.
- 4 – HORTA DA SILVA, J. A. et al. (1971) – *Natureza geológica e características geotécnicas do local da barragem de Jamba-ia-Oma* – 1.º Congresso Hispano-Luso-Americano de Geologia Económica, Madrid.
- 5 – HORTA DA SILVA, J. A. (1973a) – *Solos residuais de rochas graníticas de Angola – Subsídio para o seu conhecimento geológico-geotécnico* – LEA, Memória 195. Aguarda publicação na revista Fomento.
- 6 – HORTA DA SILVA, J. A. (1973b) – *Acerca de um solo areno-siltoso expansivo com hidrobiotite, vermiculite e montmorilonite* – LEA, Memória 193. Aguarda publicação na revista Geotecnia.
- 7 – HORTA DA SILVA, J. A. (1973c) – *Identification, mineralogy and structure of expansive soils* – 3rd International Conference on Expansive Soils, Discussion. Haifa, Israel.
- 8 – LADD, C. C. (1960) – *Mechanisms of swelling by compacted clay* – Highway Research Board, Bulletin n.º 245.
- 9 – LAMBE, T. W. and MARTIN, R. T. (1957) – *Composition and engineering properties of soils* – Proceedings, Highway Research Board.