

# Possible effects of lateral strains on deep clays

S. CAVOUNIDIS \*

**SUMMARY:** Argillaceous sediments that are sometimes caprocks to oil deposits may, under certain conditions, be treated as normally consolidated clays in the soil mechanics context, although the relevant pressure range would be far beyond that which is usual in soil mechanics.

Using test results of two clays anisotropically consolidated in the laboratory, extrapolations are made employing the proposed postulate. In particular, the effect of horizontal strains, resulting from the geometric configuration of the bedrock on which sedimentation takes place, on horizontal stresses developed in the sediment is investigated, under certain assumptions. It is concluded that for reasonable values of horizontal strains the percent change in horizontal stresses is not very significant, and anyway, compressive straining would alleviate the danger of hydraulic fracturing. On the contrary, tensile straining would increase the danger of hydraulic fracturing.

## 1. Introduction

Argillaceous sediments are often caprocks to oil deposits. A better knowledge of their mechanical properties can be of help in assessing their sealing capacity. The main problems that argillaceous sediments may pose are the danger of hydraulic fracturing due to the pressure exerted from the underlying oil and shear failure due to nature of the depositional process or to tectonically induced straining.

Soil mechanics has studied extensively the properties of clays but, of course, only of those to be found at relatively shallow depths. Deep clays would tend to be very hard but with very little, if any, overconsolidation while in the soil mechanics context normally consolidated or lightly overconsolidated clays are usually soft clays. However, it was considered possible that a cautious interpretation of some of the results of laboratory and field soil mechanics studies may be of value towards a better understanding of the properties of deep buried argillaceous sediments. The demonstration of the behaviour of deep strata which are of interest to petroleum geologists is the principal aim of this paper. It goes without saying that the conclusions from the extrapolations presented herein can only be considered as tentative. Nevertheless, one should note the data presented by SKEMPTON [1970] who, among other conclusions, points out that the principle of effective

stress seems to hold for deep, normally consolidated, sediments even for very small values of void ratio and that an essentially linear relationship between void ratio and the logarithm of the depth of burial exists for deposits with the same liquid limit down to 3000 m. depth.

Whereas total vertical stresses may be reasonably assumed to correspond to the pressure exerted by the weight of the overlying layers, the problem of the determination of lateral stresses is more complex but is very important in determining the danger of hydraulic fracturing. What will be presented herein is a soil mechanics approach to the problem of determining the influence of lateral strains on lateral stresses in deep clays. The main causes of horizontal strains may be either deposition under conditions different from  $K_0$ , such as sedimentation on a non-horizontal base or horizontal straining after deposition caused by, for example, tectonic movements. The discussion herein focusses on the case of deposition under conditions differing from  $K_0$ , in other words when horizontal straining is « geometrically » imposed during deposition.

Test results obtained by BURI [1978] on samples of Mucking Clay and by GENS [1982] on samples of Lower Cromer Till will be treated and extrapolated to stress levels relevant to deep clays. The choice was based on the fact that both these groups of tests are high quality tests performed at Imperial College on anisotropically consolidated clays differing between them in that the Lower Cromer Till is much more sandy than the Mucking Clay.

\* Dr. Spyros CAVOUNIDIS, Consultant in Soils and Foundations, 61 Anagnostopoulou, Athens, Greece (Previously, Lecturer, Imperial College, Univ. of London).

## 2. Horizontal stresses

When deposition takes place on a horizontal surface the lateral effective stresses,  $\sigma'_h$ , may be connected to the vertical effective stresses,  $\sigma'_v$ , by the coefficient of lateral earth pressure at rest,  $K_0$ .

Starting with JAKY [1948] several empirical relationships have been proposed for the approximate derivation of the value of  $K_0$  based on the value of the angle  $\phi'$ . Consequently if the presence of other factors, such as bonding, is not significant, a knowledge of the overburden, of the pore pressures and of the type of clay deposit can lead to a reasonable estimate of both total and effective horizontal stresses when  $K_0$  conditions prevail.

The foregoing conclusion holds for relatively low pressures. Evidence found in RIEKE *et al.* [1969] and in RIEKE and CHILINGARIAN [1974] showing a linear relationship between compressibility and pressure in log-log scale for high pressures, lend credence to the hypothesis that under certain conditions the above conclusions can be extended to deep clays.

More important support of this hypothesis comes from Skempton. He concludes that « even for clays and mudstones with a porosity as low as 15 percent, the ratio  $C_s/C$  is so small (less than 1 percent) that in all cases studied here, to depths of at least 3000 m. in normally-consolidated argillaceous sediments Terzaghi's equation  $p_0 = \sigma_v - u$  is satisfactory to a high degree of approximation » [SKEMPTON, 1970].  $C_s$  is the compressibility of the particles and  $C$  is the compressibility of the clay structure. Moreover the results he presents from deep borings in the Po valley, Italy, and Kambara, Japan « confirm a result already well known in the laboratory, namely that the relation between  $e_0$  and  $\log p_0$  is essentially linear for any particular clay... » [SKEMPTON, 1970]. This linear relationship was found to hold even at depths of 3000 m.

When deposition takes place on a non-horizontal surface then  $K_0$  - conditions no longer hold. The two limiting states are that of quick deposition (i.e. undrained case) and of slow deposition (i.e. drained case). Both of these states can be analyzed essentially the same way in terms of effective stresses provided the differences in the material response for drained or undrained loading are taken into account. The intermediate state, that is consolidation taking place during deposition, will not be dis-

cussed any further but it should be noted that its analysis would most probably require a two or three dimensional consolidation program that will take into account the irregular boundary condition, will simulate the depositional process and will incorporate the material properties. Programs developed for the analysis of sequential dam construction with simultaneous consolidation [CAVOUNIDIS, 1975; CAVOUNIDIS and HOEG, 1977; CHANG and DUNCAN, 1977] may be useful for performing such an analysis.

If the deposition history of the clay deposit and the geometric characteristics of the surface on which deposition of the clay took place are known then the horizontal strains in the deposit due to the deposition under non- $K_0$  conditions can be roughly determined. If the horizontal and vertical strains that occur between two states are known and if the vertical stress equals the overburden pressure then the variation of the horizontal stress may be approximately deduced. Consequently an assessment of the potential for hydraulic fracturing can be made. Such calculations will be made using the test results reported by BURI [1978] and GENS [1982].

The relevance of the proposed method is contingent upon the validity of certain assumptions not the least of which has to do with the material stiffness response at high pressures. Should the deposit be lithified the analysis presented herein does not hold. Resolving this question in practice is of course a difficult problem. However, a rough estimate could possibly be made by determining the void ratio of chippings, after submersion, recovered during deep drilling and comparing it with the void ratio to be expected of a NC clay under the pressure of the overburden. This way a rough estimate of the degree of « swelling back » and thus indirectly of bond strength could be made.

## 3. Computations based on test results on Mucking Clay

Buri's test results on Mucking Clay are presented in Figs. 1 and 2 [BURI, 1978]. More particularly in Fig. 1 the path followed during anisotropic consolidation at three different  $K$  values is presented while the corresponding strains are noted in the figure. Fig. 1, being a direct reproduction of the corresponding figure of Buri includes results of the tests beyond the consolidation stage which are not of relevance herein. Fig. 2 presents the strain de-

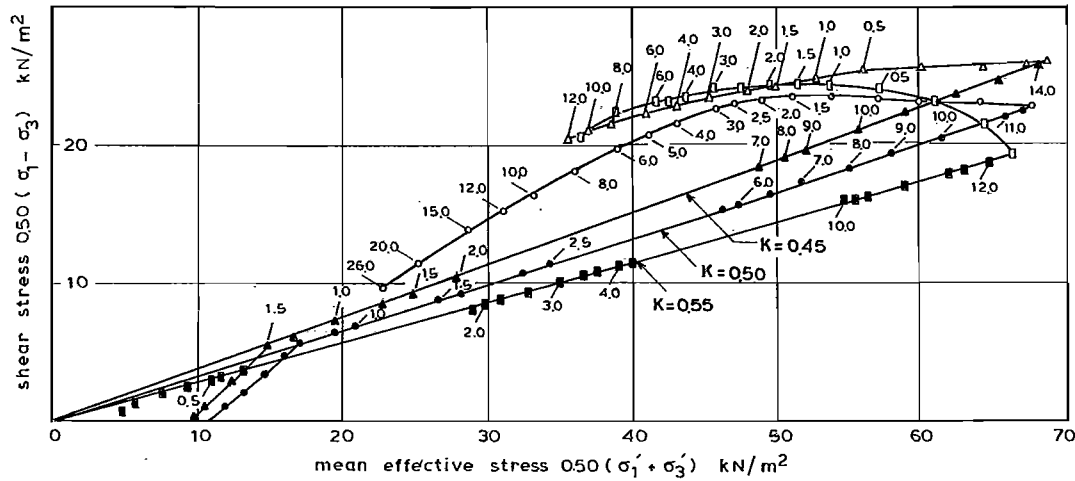


Fig. 1. - Anisotropic consolidation results at different K values of Mucking Clay samples in p - q diagram [after BURI 1978].

Fig. 1. - Risultati di consolidazione anisotropa per differenti valori di K su campioni di Mucking Clay in diagramma p - q [da BURI, 1978].

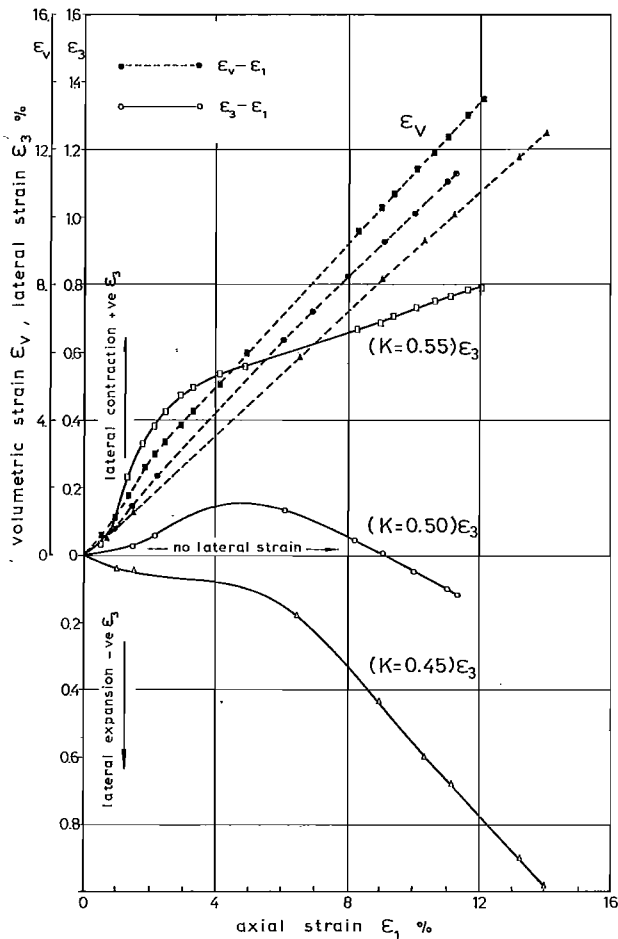


Fig. 2. - Deformation during anisotropic consolidation of Mucking Clay samples [after BURI, 1978].

Fig. 2. - Deformazione durante consolidazione anisotropa di campioni di Mucking Clay [da BURI, 1978].

velopment during the anisotropic consolidation stage, at three different K values of the same samples.

The results of the vertical strains vs the log of the mean effective stress and the log of the vertical effective stress are plotted in Figs. 3a, b and c for the values of

$$K = \left[ \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \right] = 0.45, 0.50 \text{ and } 0.55 \text{ respectively}$$

It can be observed that, after the initial part of the curve, a straight line is a good approximation for the NC part. It should be noted here that, even for clays, this approximation may not be very accurate at very high stresses. As shown in the figures, the following slopes for the curves were obtained:

K	$\Delta \epsilon_v$	Comment
	$\Delta \log \sigma'$	
0.45	36.8%	extension
0.50	35.7%	extension
0.55	37.5%	compression

As can be seen by comparing with Fig. 2, the straight line portions of Fig. 3 correspond to the straight line portions of the  $\epsilon_h$  vs  $\epsilon_v$  plot.

The value of the (constant) ratio of the two strains (after the initial curved part) is:

K	$\frac{\epsilon_h}{\epsilon_v}$	Comment
	0.45	
0.50	0.053	extension
0.55	-0.034	compression

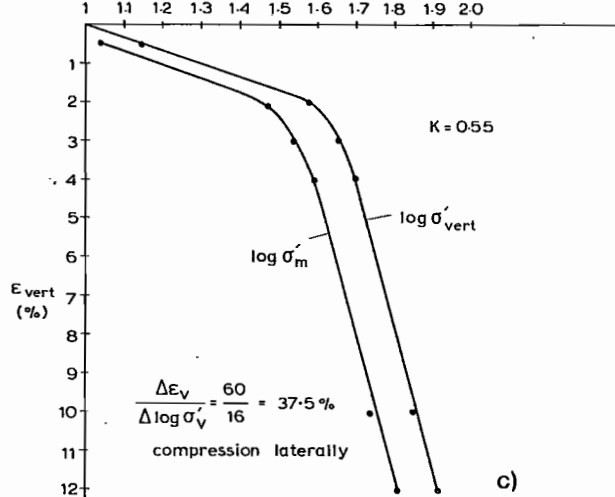
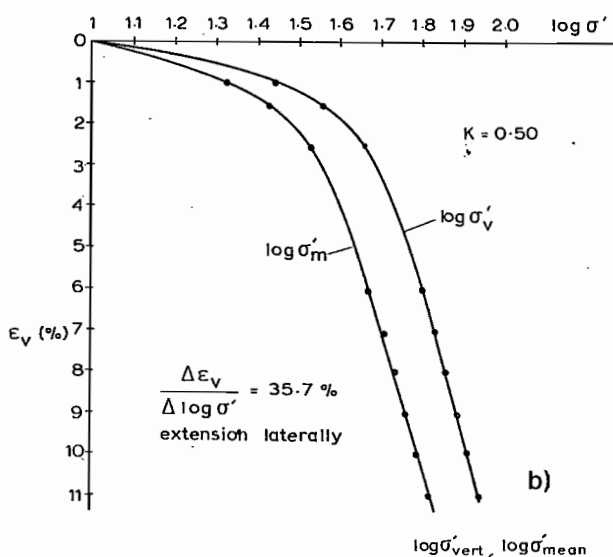
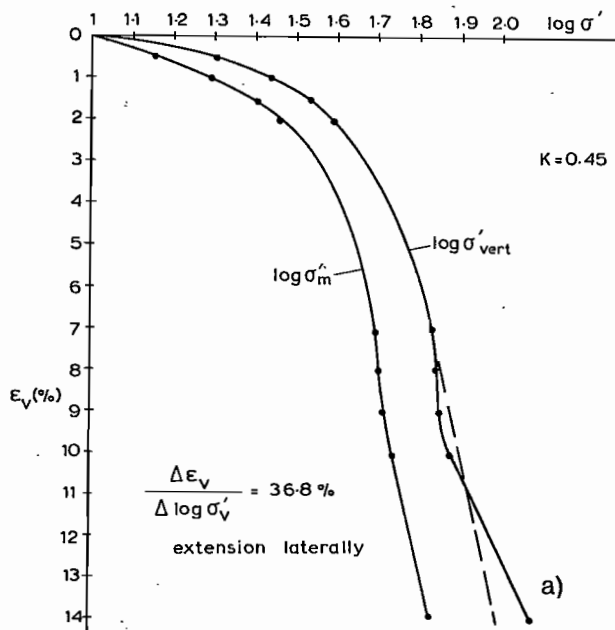


Fig. 3. - Vertical strain vs. the logarithm of vertical or mean stress of Mucking Clay: a) consolidated at  $K = 0.45$ ; b) consolidated at  $K = 0.50$ ; c) consolidated at  $K = 0.55$ .

Fig. 3. - Mucking Clay: deformazione verticale in funzione del logaritmo della tensione verticale o della tensione media: a) consolidata a  $K = 0.45$ ; b) consolidata a  $K = 0.50$ ; c) consolidata a  $K = 0.55$ .

From the above two sets of values the values of the horizontal strains with respect to the vertical stresses can be obtained:

K	$\frac{\Delta \epsilon_h}{\Delta \log \sigma'_v}$	Comment
0.45	4.08%	extension
0.50	1.89%	extension
0.55	-1.28%	compression

These are plotted in Fig. 4. Also in Fig. 5 the stress ratio vs. the strain ratio is plotted, indicating that for the particular samples the  $K_0$  value should be about 0.53.

What will now be examined is the horizontal stress change that corresponds to a horizontal strain change for a particular vertical stress level. This for a specific case is shown in Fig. 6 in a  $p - q$  diagram.

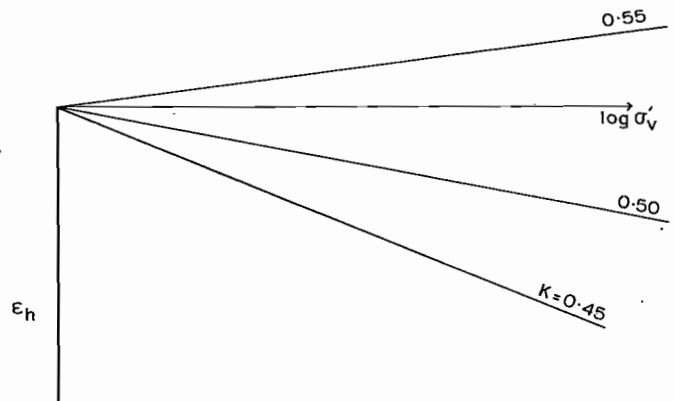


Fig. 4. - Horizontal strain vs. log vertical stress of Mucking Clay.

Fig. 4. - Mucking Clay: deformazione orizzontale in funzione del logaritmo della tensione verticale.

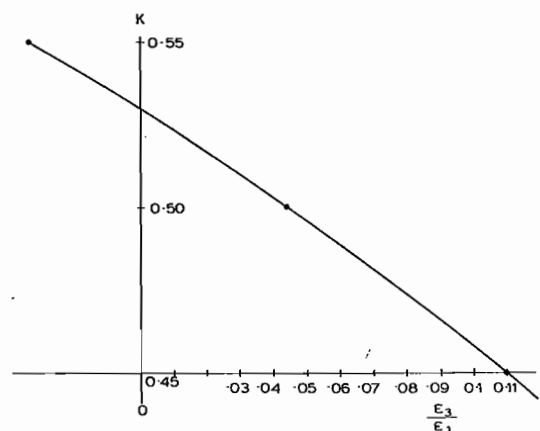


Fig. 5. - Principal stress ratio vs. principal strain ratio of Mucking Clay.

Fig. 5. - Mucking Clay: rapporto delle tensioni principali in funzione del rapporto delle deformazioni principali.

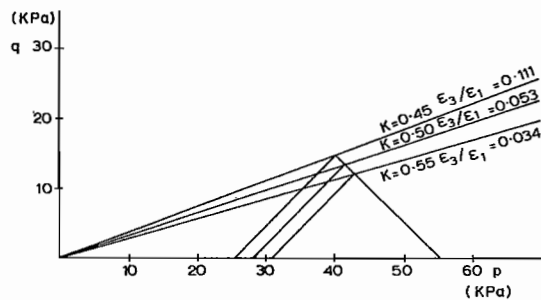


Fig. 6. - Horizontal stress change corresponding to different K at a certain vertical stress level.

Fig. 6. - *Variazione della tensione orizzontale relativa a differenti K e per determinati livelli della tensione verticale.*

Moving from e.g.  $K = 0.50$  to  $K = 0.55$  at a level of vertical stress  $\sigma'_v$  causes a change in horizontal effective stress

$$\sigma'_h = (0.55 - 0.50) \sigma'_v$$

This change corresponds to a change in horizontal strain

$$\Delta \epsilon_h = (1.89 + 1.28) \log \sigma'_v \%$$

Consequently, the rate of change of the horizontal strain with the change of horizontal stress for any  $\sigma'_v$  is given by:

$$\frac{\Delta \epsilon_h}{\Delta \sigma'_h} = \frac{1.89 + 1.28}{0.55 - 0.50} \frac{\log \sigma'_v}{\sigma'_v} = 63.4 \frac{\log \sigma'_v}{\sigma'_v} \%$$

$$K : 0.50 - 0.55$$

Similarly, moving from  $K = 0.50$  to  $K = 0.45$  produces a change in horizontal effective stress:

$$\Delta \sigma'_h = (0.45 - 0.50) \sigma'_v$$

This change corresponds to a change in horizontal strain:

$$\Delta \epsilon_h = (1.89 - 4.08) \sigma'_v \%$$

Consequently

$$\frac{\Delta \epsilon_h}{\Delta \sigma'_h} = \frac{1.89 - 4.08}{0.45 - 0.50} \frac{\log \sigma'_v}{\sigma'_v} = 44 \frac{\log \sigma'_v}{\sigma'_v} \%$$

$$K : 0.50 - 0.45$$

Fig. 7 presents the graphical version of the above relations for relatively low stresses.

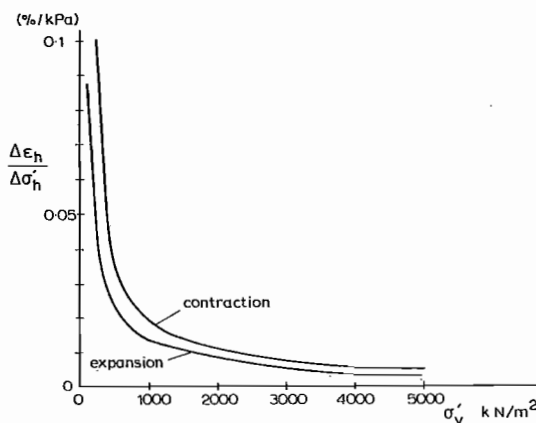


Fig. 7. - Rate of change of horizontal strain with change in horizontal stress at different vertical stress levels for Mucking Clay.

Fig. 7. - *Rapporto fra la variazione di deformazione orizzontale e la variazione di tensione orizzontale a differenti livelli della tensione verticale per la Mucking Clay.*

If we consider for example an imposed horizontal strain change of  $\Delta \epsilon_h = 0.1\%$  and consider the cases  $\sigma'_v = 20,000 \text{ kN/m}^2$  and  $\sigma'_v = 100,000 \text{ kN/m}^2$  roughly corresponding to 1000 m. and 5000 m. depth of normally consolidated soil, then the change in strain of  $\Delta \epsilon_h = 0.1\%$  will correspond to a change in horizontal stress (for the case of extension):

Case of 1000 m

$$\frac{0.001}{\Delta \sigma'_h} = \frac{44}{100} \frac{\log 20,000}{20,000} ; \Delta \sigma'_h = 10.6 \text{ kN/m}^2$$

This value is roughly a change of over 0.1% of the existing horizontal stress value.

Case of 5000 m

$$\frac{0.1}{\Delta \sigma'_h} = \frac{0.44 \log 100,000}{100,000} ; \Delta \sigma'_h = 45.4 \text{ kN/m}^2$$

This value corresponds roughly to a less than 0.1% change of the existing horizontal effective stress value.

From the above discussion it can be concluded that the deeper we go, the less percent change of horizontal stress will be required for a specified percent change in horizontal strain.

It can thus be concluded, bearing in mind all approximations and assumptions, that imposed strain change does not seem to influence significantly the horizontal stress.

#### 4. Computations based on test results on Lower Cromer Till

Some results of tests on samples of the Lower Cromer Till — a sandy clay — performed by Gens illustrate the influence of horizontal strain on horizontal stresses [GENS, 1982]. The results were extrapolated to high stress levels. They include both drained and undrained cases. The tests were performed on samples reconstituted from a slurry.

Fig. 8 shows the ratio of stress changes

$$\frac{\Delta\sigma_h}{\Delta\sigma_v} (= K) \text{ vs. the ratio of strain changes, } \frac{\Delta\varepsilon_h}{\Delta\varepsilon_v}$$

for testing in the triaxial apparatus.

The samples were set up in a « slurry » condition with a 30% water content. In this way the desired value of stress (K) was applied starting from very low levels. All the sample were consolidated up to an effective mean pressure ( $\sigma'_m$ ) of 233.3 kN/m<sup>2</sup>. The  $K_0$  value was 0.5. The negative signs in the strain ratio axis correspond to horizontal extension.

Figs. 9 and 10 present the test results for undrained conditions [GENS, 1982]. Fig. 9 in particular shows the variation of the total horizontal stress  $\sigma_h$ , the effective horizontal stress

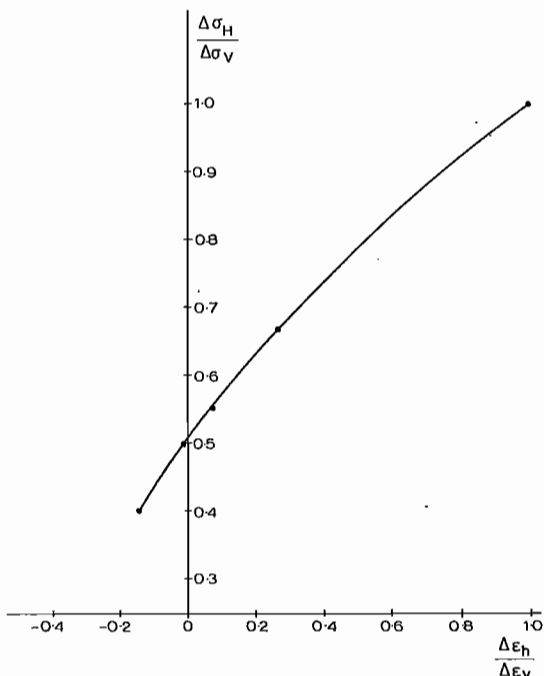


Fig. 8. - Ratio of stress changes vs. ratio of strain changes for sandy clay.

Fig. 8. - Rapporto tra le variazioni delle tensioni in funzione del rapporto tra le variazioni delle deformazioni per un'argilla sabbiosa.

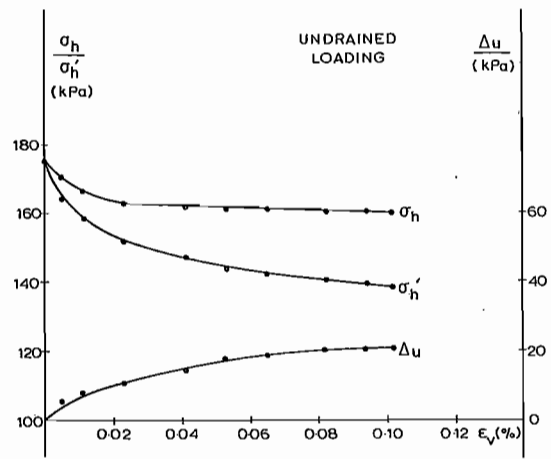


Fig. 9. - Stress-strain for undrained loading of sandy clay [after GENS, 1982].

Fig. 9. - Tensioni-deformazioni per carico non drenato su argilla sabbiosa [da GENS, 1982].

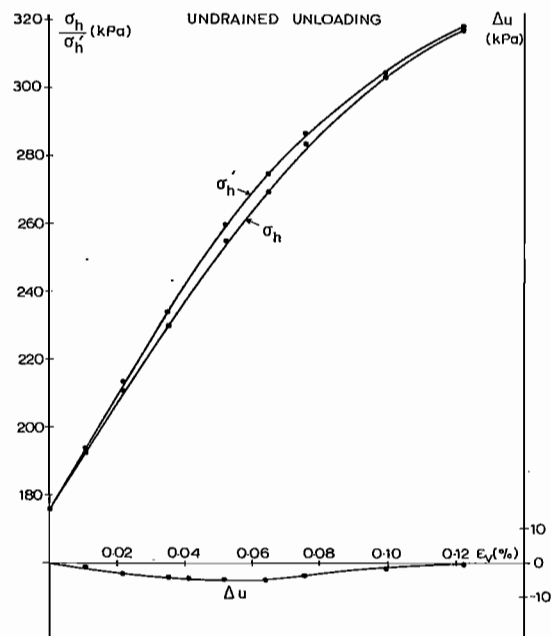


Fig. 10. - Stress-strain for undrained unloading of sandy clay [after GENS, 1982].

Fig. 10. - Tensioni-deformazioni per scarico non drenato su argilla sabbiosa [da GENS, 1982].

$\sigma'_h$  and the pore pressure  $\Delta u$  with axial strain ( $\varepsilon_v$ ). It can be observed that the pore pressure response is quite pronounced. On the contrary, Fig. 10 shows a much less severe (negative) pore pressure response  $\Delta u$  on undrained unloading. It also shows the variation of effective ( $\sigma'_h$ ) and total ( $\sigma_h$ ) horizontal stress with axial strain ( $\varepsilon_v$ ). In both of these plots it was assumed that the vertical pressure  $\sigma_v$  was constant while in actuality it was the horizontal stress  $\sigma_h$  which was constant. However, it

should be noted that, since the tests were undrained and the soil was fully saturated, there is a direct equivalence between the two situations due to the fact that the effective stress changes are the same. Prior to shearing, the samples in both cases were anisotropically consolidated ( $K = 0.5$ ) to  $\sigma_v = 350 \text{ kN/m}^2$  and  $\sigma_h = 175 \text{ kN/m}^2$ . Note that the material behaviour can be normalised and thus the plots of Figs 9 and 10 can be directly transformed and used for any other sets of pressures.

The same type of argument as the one used with BURI'S [1978] results can also be employed with the Lower Cromer Till results, in order to find the rate of change of horizontal stress with a change in horizontal strain at different levels of overburden (at different  $\sigma'_v$ ) in the case of drained conditions.

The results of the Lower Cromer Till exhibit a much stiffer response than those of the Mucking Clay since the former contains a sizeable sand fraction.

The following are the slopes of  $\Delta\varepsilon_v/\Delta\log\sigma'_v$  curves corresponding to three different K values.

K	$\frac{\Delta\varepsilon_v}{\Delta\log\sigma'_v}$	Comment
0.45	12.3 %	extension
0.50	10.54%	extension
0.55	8.98%	compression

Following the same procedure as with the Mucking Clay results the value of the stress ratio corresponding to the three K values was found

K	$\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_v}$	Comment
0.45	0.08	extension
0.50	0.01	extension
0.55	-0.075	compression

From the above two sets of results one can deduce the slope of the  $\Delta\varepsilon_h/\Delta\log\sigma'_v$  curve for the different K values:

K	$\frac{\Delta\varepsilon_h}{\Delta\log\sigma'_v}$	Comment
0.45	0.98%	extension
0.50	0.11%	extension
0.55	-0.67%	compression

From the above results the variation of the ratio of the change in horizontal strain to the change in horizontal stress as a function of the overburden pressure can be obtained. For the case of moving from the  $K_0$  (0.50) condition to  $K = 0.55$  one gets:

$$\frac{\Delta\varepsilon_h}{\Delta\sigma'_h} = 15.6 \frac{\log\sigma'_v}{\sigma'_v}$$

and for the case of moving from the  $K_0$  condition to  $K = 0.45$  one gets.

$$\frac{\Delta\varepsilon_h}{\Delta\sigma'_h} = 17.4 \frac{\log\sigma'_v}{\sigma'_v}$$

These results are also shown in the form of a plot in Fig. 11. Note that the curves exhibit the same trends as those obtained using the results of the Mucking Clay.

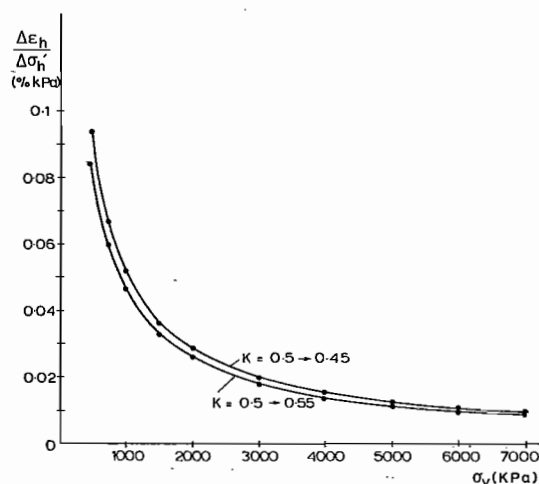


Fig. 11. - Rate of change of horizontal strain with changes in horizontal stress at different vertical stress levels for sandy clay.

Fig. 11. - Rapporto fra la variazione della deformazione orizzontale e la variazione della tensione orizzontale per diversi livelli della tensione verticale per un'argilla sabbiosa.

## 5. Conclusions

Soil mechanics can be useful in the study of deep sediments which are of interest to petroleum geologists. More particularly a rough estimate of the danger of hydraulic fracturing of argillaceous sediments that are caprocks to oil deposits may be made using a soil mechanics approach. In this paper the case of the influence of horizontal strains produced during the depositional process on the horizontal stresses was examined.

The assumption was made that strains during deposition can be roughly calculated with a knowledge of the geometry of the underlying layers and of the deposition history. It was also assumed that the vertical stress is determined by the overburden. Finally it was assumed that other factors such as secondary compression effects, aging etc. do not play a significant role and that no lithification took place. If the above hold then an approximate estimate of the variation of the horizontal stress may be made by using results from soil mechanics studies.

Two sets of such results found in the literature were used and extrapolated to values relevant to deep clays and the use of the suggested method was illustrated. Of course the actual process involves a variation of the stress ratio while the tests used correspond to consolidation at constant stress ratio. Nevertheless the approximation may be acceptable when the change of horizontal stress is very small compared to the vertical stress or, in other words, when the ratio of strain changes is small. Such a situation is believed to be more common than not. From the above examples it may be concluded that tensile horizontal strains would increase the risk of hydraulic fracturing while compressive horizontal strains would decrease it. However, it seems that the percent change of horizontal stress is not very significant for reasonable values of horizontal strain.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

This paper draws from a larger study of the author on possible uses of soil mechanics in the study of deep argillaceous sediments. This study was financed by Koninklijke/Shell Exploratie en Productie Laboratorium, Holland, which is gratefully acknowledged. Dr. P. R. Vaughan and Dr. A. Gens were very helpful throughout the study.

#### REFERENCES

- BURI P. B. (1978) - *Influence of Secondary Consolidation and Overconsolidation on the Behaviour of a Soft Alluvial Clay*. Ph. D. Thesis, Imperial College, Univ. of London.
- CAVOUNDIS S. (1975) - *Effective Stress-Strain Analysis of Earth Dams During Construction*. Ph. D. Thesis, Stanford Univ., Stanford, California.
- CAVOUNDIS S. and HOEG K. (1977) - *Consolidation During Construction of Earth Dams*. Journal of the G.E.D., ASCE, Vol. 103, No. GT10, October, pp. 1055-1067.
- CHANG C. S. and DUNCAN J. M. (1977) - *Analysis of Consolidation of Earth and Rockfill Dams*. Report No. TE 77-3, College of Engineering, Univ. of California, Berkeley.

- GENS A. (1982) - *Stress-Strain and Strength Characteristics of a Low Plasticity Clay*. Ph. D. Thesis, Imperial College, Univ. of London.
- JAKY J. (1948) - *State of Stress at Great Depth*. Proceedings, 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, Holland, Vol. 1, pp. 103-107.
- RIEKE III H. H. and CHILINGARIAN G. V. (1974) - *Compaction of Argillaceous Sediments*. Developments in Sedimentology 16, Elsevier, pp. 173-205.
- RIEKE III H. H., GHOSE S. K., FAHMAD S. A. and CHILINGARIAN G. V. (1969) - *Some Data on Compressibility of Various Clays*. International Clay Conference, Tokyo, Japan, Vol. 1, pp. 817-828.
- SKEMPTON A. W. (1970) - *The Consolidation of Clays by Gravitational Compaction*. Quarterly Journal of the Geological Society, London, Vol. 125, pp. 373-411.

#### TRADUZIONE

### Possibili effetti delle deformazioni laterali nelle argille profonde

#### 1. Introduzione

I sedimenti argillosi sono spesso di ricoprimento a giacimenti di petrolio. Una più approfondita conoscenza delle loro proprietà meccaniche può essere di aiuto nella valutazione della loro capacità di impermeabilizzazione. I problemi principali che i sedimenti argillosi possono porre sono il pericolo di fratturazione idraulica dovuta alla pressione esercitata dal petrolio sottostante e rotture da taglio dovute alla natura del processo di deposizione o a deformazioni indotte da eventi tettonici.

La Meccanica dei Terreni ha studiato approfonditamente le proprietà delle argille ma, naturalmente, solo di quelle che si trovano a profondità relativamente modeste. Le argille profonde sono di solito molto dure anche se con un grado di preconsolidazione nullo ovvero trascurabile mentre nel contesto della Meccanica dei Terreni le argille normalmente consolidate o leggermente preconsolidate sono usualmente argille tenere. Comunque si è ritenuto che una interpretazione scrupolosa di alcuni risultati di studi in sito ed in laboratorio possa essere utile ai fini di una migliore comprensione delle proprietà dei sedimenti argillosi a grosse profondità. Il principale obiettivo di questo articolo è dimostrare come sia possibile, utilizzando concetti noti di Meccanica dei Terreni, comprendere il comportamento degli strati profondi che sono di interesse per i geologi minerari. È ovvio che le conclusioni che si traggono dalle estrapolazioni nel seguito presentate possono essere considerate solo come un primo approccio. Ciononostante, sono da notare i dati già presentati da SKEMPTON [1970] che, tra le altre conclusioni, evidenziò che il principio delle pressioni effettive sembra rimanere valido per sedimenti profondi, normalmente consolidati, anche per piccolissimi valori dell'indice dei pori, ed ancora che esiste una relazione essenzialmente lineare tra indice dei pori e logaritmo della profondità, fino a profondità di 3000 m, per depositi con lo stesso limite liquido.

Mentre si può ragionevolmente assumere che le tensioni verticali totali corrispondono al peso esercitato dagli strati sovrastanti, il problema della determinazione delle tensioni laterali è più complesso e peraltro molto importante nella determinazione del pericolo di fratturazione idraulica. Nel seguito sarà presentato un approccio geotecnico al problema della determinazione dell'influenza delle deformazioni laterali sulle tensioni laterali nelle argille profonde. Le cause principali di deformazioni laterali possono essere o la



deposizione in condizioni diverse da quella Ko, come la sedimentazione su di una base orizzontale, ovvero deformazioni orizzontali dopo deposizione causate, per esempio, da movimenti tettonici. Nel seguito la discussione si focalizzerà sul caso di deposizione in condizioni diverse da quella Ko, cioè quando le deformazioni orizzontali sono imposte « geometricamente » durante la deposizione.

I risultati ottenuti da BURI [1978] da prove su campioni di Mucking Clay e da GENS [1982] da prove su campioni del Lower Cromer Till saranno trattati ed estrapolati ai livelli tensionali tipici delle argille profonde. La scelta è stata basata sul fatto che entrambi i gruppi di prove sono prove di alta qualità eseguite all'Imperial College su argille consolidate anisotropicamente e che si differenziano nel fatto che quelle del Lower Cromer Till sono molto più sabbiose della Mucking Clay.

## 2. Tensioni orizzontali

Quando la deposizione avviene su di una superficie orizzontale le tensioni effettive laterali  $\sigma'_h$ , possono essere connesse alle tensioni effettive verticali,  $\sigma'_v$ , dal coefficiente di spinta a riposo, Ko.

A partire da JAKY [1948] diverse relazioni empiriche sono state proposte per la derivazione approssimata del valore di Ko basata sul valore dell'angolo di attrito  $\phi'$ . Conseguentemente se la presenza di altri fattori, come la cementazione, non è significativa, la conoscenza del carico litostatico, delle pressioni interstiziali e del tipo di deposito di argilla può condurre ad una ragionevole valutazione delle tensioni orizzontali sia totali che effettive quando la condizione Ko prevale.

La conclusione precedente è valida per pressioni relativamente basse. I risultati ottenuti da RIEKE *et al.* [1969] e da RIEKE e CHILINGARIAN [1974] che mostrano una relazione lineare in scala logaritmica fra la compressibilità e la pressione nel campo delle alte pressioni, dà credito all'ipotesi che in certe condizioni la precedente conclusione può essere estesa alle argille profonde.

Un più importante sostegno a questa ipotesi viene da Skempton. Egli conclude che « anche per argille e argilliti con una porosità bassa fino al 15%, il rapporto Cs/C è così piccolo (minore dell'1%) che in tutti i casi studiati qui, a profondità di almeno 3000 m in sedimenti argillosi normalmente consolidati, l'equazione di Terzaghi  $p_0 = \sigma_v - u$  è soddisfacente con un elevato grado di approssimazione » [SKEMPTON, 1970]. Cs è la compressibilità delle particelle e C è la compressibilità dello scheletro solido. Inoltre i risultati che egli presenta da sondaggi profondi nella valle del Po, Italia, e Kambara, Giappone, « confermano un risultato già ben noto in laboratorio, e cioè che la relazione fra  $e_0$  ed il log  $p_0$  è essenzialmente lineare per qualsiasi tipo di argilla » [SKEMPTON, 1970]. Questa relazione lineare si è confermata valida fino a profondità di 3000 m.

Quando la deposizione avviene su di una superficie non orizzontale allora non si realizza più la condizione Ko. I due stati limiti sono quelli di deposizione rapida (i.e. condizioni non drenate) e di deposizione lenta (i.e. condizioni drenate). Entrambi questi stati possono essere analizzati allo stesso modo in termini di pressioni effettive a condizione che le differenze nella risposta del materiale per carichi drenati o non drenati siano prese in considerazione. Lo stato intermedio, e cioè la consolidazione che avviene durante la deposizione, non sarà successivamente discusso, e d'altra parte va notato che la sua analisi molto probabilmente richiederebbe un programma di consolidazione bi o tridimensionale che consenta di tener conto di condizioni al contorno irregolari, che simulino il processo di deposizione e possa incorporare le proprietà dei materiali. Programmi sviluppati per l'analisi di costruzioni di dighe in sequenza con consolidazione simultanea [CAVOUNIDIS 1975,

CAVOUNIDIS e HOEG 1977, CHANG e DUNCAN 1977] possono essere utili per seguire il tipo di analisi suddetto.

Se sono noti il processo di deposizione della formazione argillosa e le caratteristiche geometriche della superficie sulla quale la deposizione dell'argilla è avvenuta allora possono essere approssimativamente determinate le deformazioni orizzontali nel deposito dovute alla deposizione in condizioni diverse da quella Ko. Se le deformazioni orizzontali e verticali che si verificano tra i due stati sono conosciute e se la tensione verticale eguaglia la pressione litostatica allora si può approssimativamente dedurre la variazione della tensione orizzontale. Di conseguenza si può procedere ad una valutazione del potenziale di fratturazione idraulica. Tali calcoli saranno eseguiti sulla base dei risultati della sperimentazione effettuata da BURI [1978] e GENS [1982].

La efficacia del metodo proposto è subordinata alla validità di certe assunzioni non ultima delle quali è quella sulla rigidità del materiale alle alte pressioni. Se il deposito dovesse essere cementato, l'analisi qui presentata non sarebbe più valida. La risoluzione di questo problema in pratica è naturalmente difficile. In ogni caso una stima di massima potrebbe eventualmente essere fatta determinando l'indice dei pori, dopo immersione, dei frammenti estratti da sondaggi profondi e confrontandolo con l'indice dei pori atteso per un'argilla NC soggetta alla pressione in site. In tal modo potrebbe essere effettuata una prima stima del grado di « swelling back » e così indirettamente della resistenza dei legami.

## 3. Calcoli basati sui risultati delle prove sulla Mucking Clay

I risultati della sperimentazione effettuata da BURI sulla Mucking Clay sono presentati nelle Figure 1 e 2 [BURI, 1978]. Più in particolare in Fig. 1 è presentato il percorso seguito durante la consolidazione anisotropa per tre differenti valori di K e sono evidenziati i corrispondenti valori della deformazione. La Fig. 1, essendo una diretta riproduzione della corrispondente figura di BURI include risultati delle prove al di là della fase di consolidazione che non sono di interesse per il nostro discorso. La Fig. 2 presenta l'evolversi delle deformazioni durante la fase di consolidazione anisotropa, a tre diversi valori di K degli stessi campioni.

Le deformazioni verticali risultanti in funzione del log della tensione effettiva verticale sono diagrammate nelle Figure 3a, 3b e 3c per i valori di

$$K \left[ \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \right] = 0.45, 0.50 \text{ e } 0.55 \text{ rispettivamente.}$$

Si può osservare che, dopo il tratto iniziale della curva, la parte NC può ben approssimarsi con una linea retta. Si dovrebbe notare qui che, anche per le argille, questa approssimazione non può essere molto accurata per valori delle tensioni molto alti. Per le curve sono state ottenute le seguenti pendenze:

K	$\frac{\Delta \epsilon_v}{\Delta \log \sigma'}$	commento
	0.45	
0.50	35.7%	estensione
0.55	37.5%	compressione

Come si può vedere dal confronto con la Fig. 2, i tratti rettilinei della Fig. 3 corrispondono ai tratti rettilinei del diagramma  $\epsilon_h - \epsilon_v$ .

Il valore del rapporto (costante) tra le due deformazioni (dopo il tratto iniziale curvo) è:

K	$\frac{\epsilon_h}{\epsilon_v}$	commento
0.45	0.111	estensione
0.50	0.053	estensione
0.55	-0.034	compressione

Dai due gruppi di valori su riportati si possono ricavare i valori delle deformazioni orizzontali correlati alle tensioni verticali:

K	$\frac{\Delta\epsilon_h}{\Delta\log\sigma'_v}$	commento
0.45	4.08%	estensione
0.50	1.89%	estensione
0.55	-1.28%	compressione

Questi sono diagrammati in Fig. 4. Inoltre in Fig. 5 è diagrammato il rapporto delle tensioni in funzione del rapporto delle deformazioni, e si evince che per particolari campioni il valore di  $K_0$  dovrebbe essere pari a circa 0.53.

Ciò che ora sarà esaminato è la variazione della tensione orizzontale corrispondente a una variazione di deformazione orizzontale per un particolare livello tensionale verticale. Ciò è mostrato, per un caso specifico, in Fig. 6 in un diagramma p - q.

Passando per esempio da  $K = 0.50$  a  $K = 0.55$  per una determinata tensione verticale  $\sigma'_v$  si produce nella tensione effettiva orizzontale una variazione

$$\sigma'_h = (0.55 - 0.50) \sigma'_v$$

Tale variazione corrisponde ad una variazione nella deformazione orizzontale

$$(\Delta\epsilon_h) = (1.89 + 1.28) \log \sigma'_v \%$$

Di conseguenza, il rapporto tra la variazione della deformazione orizzontale e la variazione della tensione orizzontale per un generico  $\sigma'_v$  è dato da

$$\frac{\Delta\epsilon_h}{\Delta\sigma'_h} = \frac{1.89 + 1.28}{0.55 - 0.50} \frac{\log \sigma'_v}{\sigma'_v} = 63.4 \frac{\log \sigma'_v}{\sigma'_v} \%$$

K : 0.50 - 0.55

Similmente, passando da  $K = 0.50$  a  $K = 0.45$  si produce una variazione nella tensione effettiva orizzontale:

$$\Delta\sigma'_h = (0.45 - 0.50) \sigma'_v$$

Essa corrisponde ad una variazione nella deformazione orizzontale:

$$\Delta\epsilon_h = (1.89 - 4.08) \sigma'_v \%$$

Di conseguenza

$$\frac{\Delta\epsilon_h}{\Delta\sigma'_h} = \frac{1.89 - 4.08}{0.45 - 0.50} \frac{\log \sigma'_v}{\sigma'_v} = 44 \frac{\log \sigma'_v}{\sigma'_v} \%$$

K : 0.50 - 0.45

In Fig. 7 è mostrata la rappresentazione grafica delle precedenti relazioni per valori delle tensioni relativamente basse.

Se per esempio imponiamo una variazione della deformazione orizzontale  $\Delta\epsilon_h = 0.1\%$  e consideriamo i casi  $\sigma'_v = 20.000 \text{ KN/m}^2$  e  $\sigma'_v = 100.000 \text{ KN/m}^2$  grosso modo corrispondenti alle profondità di 1.000 m e 5.000 m per un terreno normalmente consolidato, allora la variazione nella deformazione di  $\Delta\epsilon_h = 0.1\%$  corrisponderà ad una variazione nella tensione orizzontale (per il caso di estensione):

*Caso di 1000 m*

$$\frac{0.001}{\Delta\sigma'_h} = \frac{44}{100} \frac{\log 20.000}{20.000}; \quad \Delta\sigma'_h = 10.6 \text{ KN/m}^2$$

Questo valore rappresenta grosso modo una variazione maggiore dello 0.1% del valore esistente di tensione orizzontale.

*Caso di 5000 m*

$$\frac{0.1}{\Delta\sigma'_h} = \frac{0.44 \log 100.000}{100.000}; \quad \Delta\sigma'_h = 45.4 \text{ KN/m}^2$$

Questo valore corrisponde grosso modo ad una variazione minore dello 0.1% del valore della tensione effettiva orizzontale esistente.

Da quanto finora esposto si può concludere che quanto maggiore è la profondità, tanto minore è la variazione percentuale di tensione orizzontale richiesta per una prefissata variazione percentuale della deformazione orizzontale.

Si può concludere pertanto, tenendo presente però tutte le approssimazioni e le assunzioni, che una variazione di deformazione imposta non sembra influenzare significativamente la tensione orizzontale.

#### 4. Calcoli basati sui risultati delle prove sul Lower Cromer Till

Alcuni risultati di prove su campioni del Lower Cromer Till — un'argilla sabbiosa — eseguite da Gens illustrano l'influenza delle deformazioni orizzontali sulle tensioni orizzontali [GENS 1982]. I risultati sono stati ottenuti a livelli tensionali piuttosto bassi e sono stati estrapolati a livelli tensionali alti. Essi sono relativi sia a prove in condizioni drenate che a prove in condizioni non drenate. Le prove sono state eseguite su campioni rimaneggiati.

La Fig. 8 mostra l'andamento del rapporto delle variazioni delle tensioni  $\frac{\Delta\sigma_h}{\Delta\sigma_v}$  (= K) in funzione del rapporto

delle variazioni delle deformazioni,  $\frac{\Delta\epsilon_h}{\Delta\epsilon_v}$ , per prove ese-

guite con l'apparecchio triassiale. I provini sono stati montati con un contenuto d'acqua del 30%. In questo modo il valore desiderato del rapporto tensionale (K) è stato applicato partendo da livelli tensionali molto bassi. Tutti i campioni sono stati consolidati fino ad una pressione effettiva media ( $\sigma'_m$ ) di 233.3 KN/m<sup>2</sup>. Il valore di  $K_0$  è stato posto uguale a 0.5. I segni negativi sull'asse dei rapporti di deformazioni corrispondono ad estensione orizzontale.

Le Figg. 9 e 10 presentano i risultati delle prove in condizioni non drenate [GENS 1982]. In Fig. 9, in particolare, è mostrata la variazione della tensione orizzontale totale  $\sigma_h$ , della tensione orizzontale effettiva  $\sigma'_h$  e della pressione neutra  $\Delta u$  in funzione della deformazione assiale ( $\epsilon_v$ ). Si può osservare che la variazione della pressione neutra è piuttosto pronunciata. Al contrario, la Fig. 10 mostra una variazione molto meno evidente (negativa) della pressione neutra  $\Delta u$  per una riduzione del carico in condizioni non

drenate. Mostra inoltre la variazione delle tensioni orizzontali totali ( $\sigma_h$ ) ed effettiva ( $\sigma'_h$ ) in funzione della deformazione assiale ( $\epsilon_v$ ). In entrambi questi diagrammi si è assunto che la pressione verticale  $\sigma_v$  fosse costante, mentre nella realtà era la tensione orizzontale  $\sigma_h$  ad essere costante. Ad ogni modo, si dovrebbe notare che, poiché le prove sono state eseguite in condizioni non drenate ed il terreno era totalmente saturo, c'è una diretta equivalenza fra le due situazioni dovuta al fatto che le variazioni delle tensioni effettive erano le stesse. Prima di portarli a rottura, in entrambi i casi i provini sono stati consolidati anisotropicamente ( $K = 0.5$ ) con una  $\sigma_v = 350 \text{ KN/m}^2$  ed una  $\sigma_h = 175 \text{ KN/m}^2$ . Si noti che il comportamento del materiale può essere normalizzato e pertanto i diagrammi delle Figg. 9 e 10 possono essere direttamente trasformati e utilizzati per qualsiasi altra condizione di pressione.

Lo stesso tipo di discussione fatto relativamente ai risultati di BURL [1978] può essere ripetuto riguardo i risultati del Lower Cromer Till, allo scopo di trovare il rapporto della variazione della tensione orizzontale con una variazione della deformazione orizzontale a differenti livelli della tensione in sito nel caso di condizioni drenate.

I risultati del Lower Cromer Till evidenziano un comportamento molto più rigido di quello della Mucking Clay poiché il primo (Lower Cromer Till) contiene un'alta frazione sabbiosa.

Qui di seguito sono riportate la pendenze delle curve

$\frac{\Delta \epsilon_v}{\Delta \log \sigma'_v}$  corrispondenti a tre differenti valori di K

K	$\frac{\Delta \epsilon_v}{\Delta \log \sigma'_v}$	commento
0.45	12.3 %	estensione
0.50	10.54%	estensione
0.55	8.98%	compressione

Usando la stessa procedura con la quale sono stati trattati i risultati della Mucking Clay sono stati trovati i valori dei rapporti fra le tensioni corrispondenti ai tre valori di K

K	$\frac{\epsilon_h}{\epsilon_v}$	commento
0.45	0.08	estensione
0.50	0.01	estensione
0.55	-0.075	compressione

Dai precedenti due gruppi di risultati si può dedurre la

pendenza delle curve  $\frac{\Delta \epsilon_h}{\Delta \log \sigma'_v}$  per i diversi valori di K

K	$\frac{\Delta \epsilon_h}{\Delta \log \sigma'_v}$	commento
0.45	0.98%	estensione
0.50	0.11%	estensione
0.55	-0.67%	compressione

Dai risultati precedenti si può ricavare l'andamento del rapporto tra la variazione della deformazione orizzontale e la variazione della tensione orizzontale in funzione della pressione in sito. Per il caso in cui si passa dalla condizione  $K_0$  (0.50) alla condizione  $K = 0.55$  si ottiene:

$$\frac{\Delta \epsilon_h}{\Delta \sigma'_h} = 15.6 \frac{\log \sigma'_v}{\sigma'_v}$$

e per il caso in cui si passa dalla condizione  $K_0$  a  $K = 0.45$  si ottiene:

$$\frac{\Delta \epsilon_h}{\Delta \sigma'_h} = 17.4 \frac{\log \sigma'_v}{\sigma'_v}$$

Questi risultati vengono anche mostrati sotto forma di diagramma in Fig. 11. È da notare che le curve esibiscono andamenti simili a quelli delle curve ottenute usando i risultati della Mucking Clay.

## 5. Conclusioni

La Meccanica dei Terreni può essere utile nello studio dei sedimenti profondi che sono di interesse per i geologi minerali. Più in particolare utilizzando un approccio geotecnico si può procedere ad una valutazione approssimata del pericolo di fratturazione idraulica dei sedimenti argillosi che sono a ricoprimento di giacimenti di petrolio. In questo articolo è stato esaminato il problema dell'influenza delle deformazioni orizzontali prodotte durante il processo di deposizione sulle tensioni orizzontali.

Si è ipotizzato che le deformazioni durante la deposizione possano essere approssimativamente calcolate attraverso la conoscenza della geometria degli strati sottostanti e della storia della deposizione. Si è inoltre assunto che la tensione verticale sia pari a quella geostatica. Infine si è assunto che gli altri fattori quali gli effetti di compressione secondari, « invecchiamento » ecc. non giochino un ruolo significativo e che non si verifichi diagenesi. Se le ipotesi suddette sono lecite, allora utilizzando dei risultati di studi di Meccanica dei Terreni si può pervenire ad una discreta valutazione della variazione della tensione orizzontale.

Due gruppi di risultati di studi geotecnici, attinti dalla letteratura, sono stati utilizzati ed estrapolati a valori tipici per argille profonde ed è stato illustrato l'uso del metodo proposto. Naturalmente il processo reale implica una variazione del rapporto tensionale mentre le prove usate prevedono consolidazione a rapporto di tensioni costanti. Cionondimeno l'approssimazione può essere accettabile quando la variazione della tensione orizzontale è molto piccola confrontata alla tensione verticale ovvero, in altre parole, quando il rapporto fra le variazioni della deformazione è piccolo. In effetti tale situazione potrebbe essere molto più comune di quanto non si crede. Dagli esempi precedenti si può concludere che deformazioni da trazione incrementerebbero il rischio di fratturazione idraulica mentre deformazioni orizzontali da compressione lo ridurrebbero. Ad ogni modo sembra che la variazione percentuale della tensione orizzontale non sia molto significativa per valori ragionevoli della deformazione orizzontale.

(traduzione di Armando Lucio Simonelli)