

Creep di argille indisturbate in prove di taglio di lunga durata

G. CALABRESI (*)

SOMMARIO: Lo studio sperimentale del comportamento di alcuni terreni argillosi, in semplici prove di taglio diretto in uno stato di sollecitazioni costanti, protratte per lunghissimi tempi (fino a oltre 600 giorni), ha messo in luce la possibilità di rappresentare le leggi della deformazione per mezzo di un modello reologico semplice.

La validità delle ipotesi fatte appare confermata dai risultati ottenuti in altre esperienze, condotte sui medesimi terreni in un diverso laboratorio con tecniche del tutto differenti.

1. Premessa.

Molte ricerche teoriche e sperimentali sono state dedicate negli ultimi anni al creep dei terreni argillosi [SUKLJE, VIDMAR 1961; MURAYAMA, SHIBATA 1961, 1964; GEUZE, TAN 1963; GEUZE 1964].

Sono stati proposti alcuni complessi modelli teorici per esprimere il comportamento reologico delle argille e, nelle esperienze effettuate, si è osservata una buona rispondenza dei dati sperimentali alle ipotesi fatte.

In queste ricerche, tuttavia, la durata delle prove non ha generalmente superato qualche giorno e ben scarsi sono i dati esistenti sul creep di terreni argillosi per più lunghi periodi di tempo.

Lo studio di un problema di ingegneria relativo ai lenti movimenti di terreni argillosi, suggerì quindi un'indagine sulle caratteristiche reologiche di questi con prove di grande durata.

I risultati sperimentali presentati in questa nota non derivano quindi da una ricerca generale e sistematica sul problema del creep di terreni, ma da una serie di prove eseguite su campioni indisturbati, con il limitato scopo di ottenere una descrizione qualitativa del comportamento nel tempo dei terreni esaminati, in condizioni di tensioni tangenziali costanti.

Considerate le proprietà naturali dei terreni lagunari, come quelli studiati, e in particolare la loro eterogeneità ed anisotropia, l'esame analitico dei fenomeni meccanici osservati o la ricerca di relazioni teoriche di più generale validità non appariva possibile.

Si sono perciò utilizzate le più semplici apparecchiature sperimentali, non sembrando giustifi-

cato il ricorso a esperienze concettualmente più soddisfacenti, ma di maggiore complessità e più soggette a fattori difficilmente controllabili.

I risultati ottenuti, tuttavia, suggeriscono la possibilità di adottare un modello reologico molto semplice del comportamento dei terreni nelle condizioni studiate e possono fornire le basi di una teoria razionale e di maggiore validità.

2. Caratteristiche dei terreni esaminati.

Le prove sono state eseguite su tre campioni indisturbati prelevati a quote diverse mediante un campionatore statico a pistone di grandi dimensioni, in un sondaggio effettuato in terreni di origine lagunare del quaternario.

Il piano di campagna è all'intorno orizzontale e la superficie piezometrica, che subisce piccole oscillazioni stagionali, è mediamente a 1 m di profondità.

I campioni, appartenendo a livelli diversi, rappresentano terreni di caratteristiche nettamente differenti, che verranno semplicemente indicati con A, B, e C.

Il terreno A è un'argilla di alta plasticità, normalmente consolidata, con una piccola frazione di sostanza organica: il campione è stato prelevato a una profondità di 19 m.

Il terreno B è un'argilla sovraconsolidata di media plasticità; il campione è stato prelevato a 21,50 metri.

Il terreno C è un limo argilloso di bassa plasticità leggermente sovraconsolidato; il campione è stato prelevato a 28 metri.

In fig. 1 sono illustrate le curve granulometriche dei tre campioni e nella tabella I le caratteristiche fisiche e meccaniche e i valori della pressione verticale efficace, in situ.

(*) Prof. ing. Giovanni CALABRESI, Libero Docente in *Geotecnica*, Assistente ordinario alla Cattedra di *Tecnica delle Costruzioni I* della Facoltà di Ingegneria, Università di Roma.

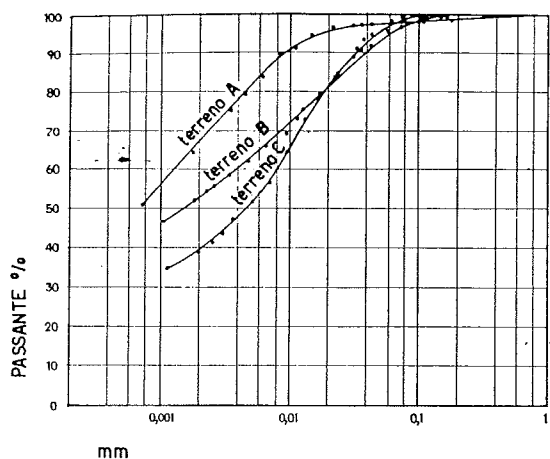


Fig. 1

I dati sulle caratteristiche meccaniche derivano da una serie di numerose prove, resa possibile dalle grandi dimensioni dei campioni prelevati. Inoltre i dati ricavati su campioni prelevati alle stesse quote in sondaggi vicini hanno permesso di inquadrare meglio i risultati e di ottenere, in definitiva, una approfondita conoscenza delle proprietà dei terreni esaminati.

TABELLA I

	w	w _l	w _p	CF	c _u	c'	φ	σ' _{ov}
	%	%	%	%	kg/cm ²	kg/cm ²		kg/cm ²
TERRENO A	53,6	84	31	68	1,2	0,21	16°	1,75
TERRENO B	29,2	55	23	53	0,75	0,10	24°	1,95
TERRENO C	27,9	37	21	39	1,6	0,20	26°	2,60

La resistenza al taglio in condizioni non drenate è stata determinata con prove a dilatazione laterale libera, triassiali e con scissometro. I parametri di resistenza in termini di tensioni efficaci sono stati ottenuti con prove di taglio drenate e con prove triassiali consolidate non drenate.

3. Tecnica sperimentale.

Le prove creep sono state effettuate con un apparecchio di taglio diretto con controllo delle sollecitazioni, applicando tensioni normali e tangenziali per mezzo di pesi. Le scatole dell'apparecchio hanno una sezione quadrata di 60 mm di lato o circolare con un diametro di 79,8 mm.

Sono state impiegate contemporaneamente otto di queste scatole, le quali sono poste su un pesante telaio in ferro in uno scantinato di un antico fab-

bricato in muratura, dove si verificano piccole variazioni della temperatura e della umidità. La temperatura ambientale media è di 20° C, e subisce una variazione giornaliera minore di ± 1,5° C e stagionale di ± 2,5° C.

I provini sono stati consolidati nelle loro scatole, in condizioni quindi di deformazioni trasversali nulle, mantenendo ogni incremento di carico per un periodo di 2-3 giorni, molto maggiore del tempo di consolidazione primaria. In tutte le prove la superficie di taglio era normale all'asse longitudinale dei campioni.

Si sono seguite tre diverse procedure per l'applicazione delle tensioni tangenziali.

In una prima serie di prove (I) venivano applicati piccoli incrementi della forza trasversale ad intervalli di tempo variabili, fino a raggiungere il valore prestabilito di tensione tangenziale, che è stato mantenuto per tempi molto lunghi, fino ad un massimo di 580 giorni.

In una seconda serie di prove (II) la velocità di applicazione della forza trasversale è stata aumentata, riducendo gli intervalli di tempo fra gli incrementi da alcuni giorni a 8-48 ore, secondo i casi.

Nell'ultima serie (III) la tensione tangenziale di prova è stata raggiunta in poche ore effettuando contemporaneamente una riduzione della tensione normale.

Al termine del periodo di misura, in alcune prove la tensione tangenziale è stata semplicemente annullata, in altre si è effettuata una riduzione graduale della tensione normale mantenendo costante quella tangenziale, fino a produrre la rottura del provino.

Un quadro riassuntivo delle prove creep eseguite è presentato nella Tabella II.

4. Risultati delle prove.

Fin dalle prime prove (serie I) si osservò che la velocità di deformazione, dopo l'applicazione della forza trasversale, diminuiva rapidamente, ma aveva ancora valori significativi un mese dopo l'applicazione dell'ultimo incremento.

In queste prove la forza trasversale era stata mantenuta costante per un mese e poi leggermente aumentata. Questa procedura probabilmente aveva qualche influenza sul comportamento del provino nel primo periodo dello stadio seguente. Tre prove della prima serie (due sul campione del terreno C e una su quello di A) sono state comunque proseguite, mantenendo costante il valore della tensione tangenziale così raggiunta, per più di 400 giorni.

Tenendo conto dei primi risultati ottenuti fu

TABELLA II

Campione			terreno A	terreno A	terreno A	terreno B	terreno C	terreno C	terreno C	terreno C
Serie della prova			I	II	II	II	I	I	III	III
Pressione di consolidazione	σ'_c	kg/cm ²	5,00	3,00	3,00	3,00	1,00	3,00	4,00	4,00
Pressione di prova	σ'	kg/cm ²	5,00	3,00	3,00	3,00	1,00	3,00	3,61	3,00
Tensione tangenz. applicata	τ	kg/cm ²	1,35	0,65	0,80	1,10	0,45	0,905	1,35	1,35
Resistenza al taglio	τ_t	kg/cm ²	1,65	1,07	1,07	1,34	0,69	1,66	1,96	1,66
	$\frac{\tau}{\tau_t}$	—	0,82	0,61	0,75	0,82	0,65	0,54	0,69	0,81
Durata compl. della prova		giorni	640	195	183	380	484	481	168	163
Contenuto in acqua finale	w_t	%	46,0	50,0	51,5	28,8	20,7	22,2	23,9	23,2
Deformazione trasversale iniziale (teorica)	δ_o	mm	0,559	0,429	1,064	0,665	0,845	0,501	1,557	1,799
Deformazione finale	δ_t	mm	1,795	0,452	1,133	0,749	1,086	0,623	1,611	1,865
Parametri caratteristici	b	giorni	100	43	35	30	61	61	60	60
	v_o	1/giorno	2,358	0,536	2,00	2,75	3,875	1,961	1,00	1,210

iniziata la seconda serie di prove, sul solo campione del terreno A. In queste prove il valore prestabilito della tensione tangenziale è stato raggiunto mediante piccoli incrementi, in 5-8 giorni e poi mantenuto costante. Ne risultò, com'era da attendersi, una maggiore influenza dei fenomeni di consolidazione sul comportamento dei provini.

Infatti nei primi giorni dopo l'applicazione dell'ultimo incremento di tensione tangenziale, si sono avute deformazioni trasversali e normali dei provini molto maggiori che nelle prove della serie I.

Per evitare questi effetti fu eseguita la serie III di prove, con la procedura prima descritta. In base alle variazioni di indice di porosità che si erano verificate nella serie I nei primi 3 giorni di prova, fu possibile determinare approssimativamente la riduzione da apportare alla tensione normale contemporaneamente all'applicazione di quella tangenziale, per ridurre al minimo la consolidazione.

Due prove di questo tipo sono state eseguite per il terreno C. In ambedue è stata applicata una tensione tangenziale di 1,35 Kg/cm², mentre la tensione normale è stata ridotta da 4,0 a 3,6 Kg/cm² in una prova e da 4,0 a 3,0 Kg/cm² nell'altra. Nel primo caso si ebbe una sensibile consolidazione, nel secondo l'effetto fu molto minore.

Nonostante le differenti procedure seguite, i risultati delle tre serie di prove possono essere esaminati e discussi congiuntamente, poiché, relativamente al comportamento a lungo termine, tutti i campioni sembrano seguire le stesse leggi reologiche.

Poiché non è possibile conoscere l'effettivo stato di deformazione che si produce nelle prove di taglio diretto, il comportamento dei provini è descritto in termini di deformazioni totali misurate, anziché di distorsioni e allungamenti unitari.

Nelle figg. 2 e 3 sono diagrammate in funzione del tempo, in scala lineare, le deformazioni trasversali misurate in alcune prove tipiche relative ai terreni A e C. Questi e i successivi diagrammi permettono di individuare, nel comportamento dei provini, dopo l'applicazione dell'ultimo incremento di tensione tangenziale, tre tipici periodi.

Nel primo, della durata di 2-3 giorni, la velocità di deformazione appare influenzata principalmente dalla pressione interstiziale indotta, alla quale è dovuta la consolidazione osservata.

La procedura di prova seguita nella serie III ha diminuito, ma non eliminato, questo effetto.

In un secondo periodo, di durata compresa fra 3 e 24 giorni, si verificano ancora forti velocità di deformazione; tuttavia tenendo conto del coefficiente di consolidazione dei terreni e delle condizioni di drenaggio delle prove, si deve escludere che l'aumento iniziale di pressione interstiziale sia il fattore determinante del comportamento osservato.

Nel periodo successivo, infine, che copre tutto il restante tempo di prova, il comportamento reologico di tutti i provini appare molto ben descritto da un semplice *corpo di Kelvin*.

Dette G e C le costanti caratteristiche dell'elemento elastico e di quello viscoso, collegati in parallelo, riferendosi al caso presente, le equa-

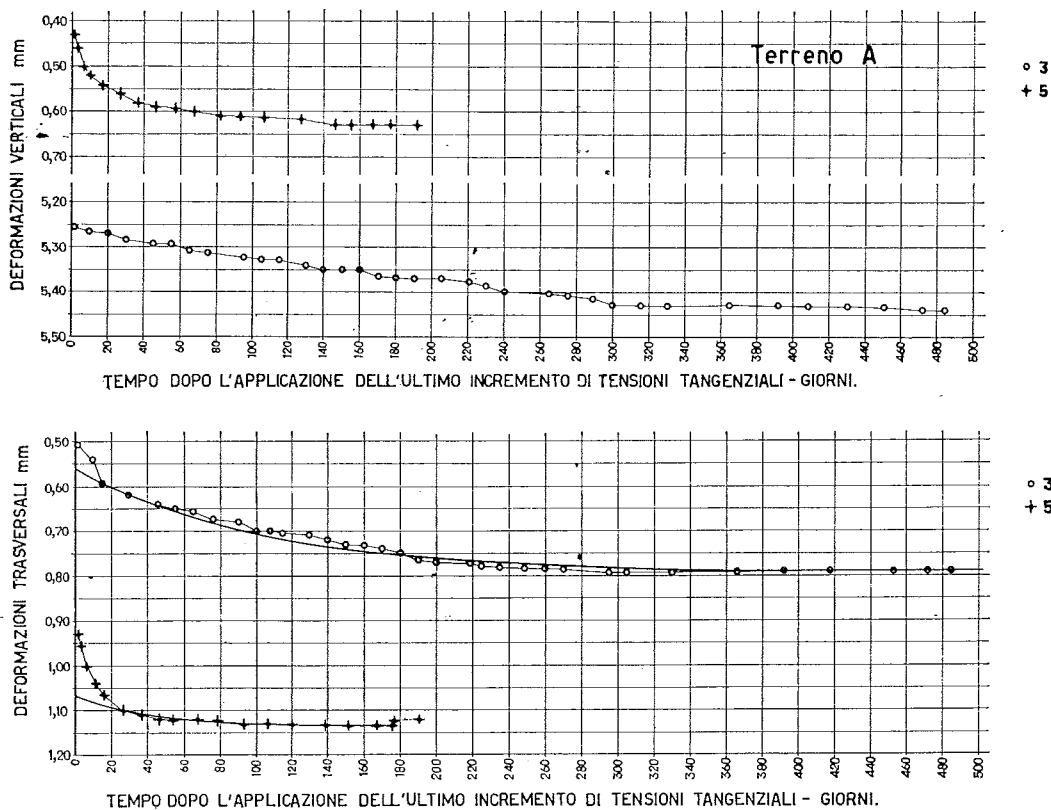


Fig. 2

zioni che descrivono il comportamento del modello in condizioni di sollecitazioni costanti sono

$$v = v_0 e^{-\frac{\tau}{b}}$$

$$\delta = \delta_0 + b v_0 \left(1 - e^{-\frac{\tau}{b}} \right)$$

dove δ è la deformazione del modello, $v = \frac{d\delta}{dt}$ la velocità di deformazione, δ_0 e v_0 i loro valori al tempo $t = 0$ e b il tempo di ritardo.

Perché il modello sia valido, quindi, diagrammando le velocità di deformazione, in scala logaritmica, in funzione del tempo, in scala lineare, i punti sperimentali devono disporsi lungo una retta. Effettivamente, in tutte le prove eseguite le velocità di deformazione misurate sembrano oscillare attorno a una relazione di questo tipo (fig. 4-5).

Questo modello, tuttavia, non sembra applicabile all'inizio del creep, quando la velocità di deformazione sono molto maggiori.

Prescindendo da questo fatto, sono stati calcolati i valori teorici iniziali delle deformazioni δ_0 e della velocità v_0 , estrapolando al momento dell'applicazione dell'ultimo incremento di sforzo trasver-

sale le relazioni valide del terzo periodo del processo.

La validità del modello descritto per rappresentare il comportamento del terreno appare allora con maggiore evidenza nei diagrammi delle figg. 6 e 7, dove sono state esaminate le deformazioni, anziché le velocità di deformazione. I valori di

$$y = - \frac{\delta - \delta_0}{b v_0}$$

sono stati infatti diagrammati in scala logaritmica in funzione del tempo e paragonati alle relazioni teoriche.

E' notevole la concordanza rilevabile per tutta la durata delle prove. La stessa relazione teorica è stata quindi riportata nei diagrammi lineari delle figure 2 e 3.

Le oscillazioni della velocità di deformazione potrebbero essere in parte attribuite alle variazioni stagionali di temperatura. Tuttavia un confronto tra le temperature registrate e i valori della velocità di deformazione non superiscono una completa correlazione dei due fatti.

I valori dei parametri della legge teorica di deformazione per le varie prove sono riportati nella tavola 2. Come ci si aspettava, la velocità teorica iniziale è fortemente influenzata dalla procedura seguita nella prova.

Il parametro b , al contrario, che rappresenta il rapporto tra le costanti di viscosità ed elasticità del modello reologico, sembra avere un intrinseco valore.

Come appare dalla tavola 2, nel terreno A, che è fortemente argilloso, il parametro b tende ad aumentare al diminuire del contenuto in acqua, mentre non sembra influenzato dal contenuto in acqua del terreno C, che ha una minore frazione di argilla.

Si può anche rilevare che le deformazioni dei provini durante il lungo periodo di creep sono, in relazione a quelle immediate, realmente significative. Con i dati di tutte le prove di taglio effettuate, alcune delle quali giunsero a rottura, si sono ottenuti i diagrammi sforzi-deformazioni per i

terreni A e C (figure 8 e 9). Essi mostrano chiaramente l'importanza delle deformazioni differite nel tempo per creep, nelle caratteristiche meccaniche dei due terreni.

Una diversa questione si cercò anche di indagare in questa ricerca: se dopo un lungo periodo di creep potesse verificarsi un improvviso aumento della velocità di deformazione, in conseguenza di qualche modifica strutturale del terreno, che determinasse la rottura. Questo fatto non si verificò mai nelle prove eseguite. Inoltre la resistenza a rottura al termine del lungo periodo di creep non si discostò apprezzabilmente da quella misurata inizialmente in prove di taglio di normale durata.

Nel secondo periodo di creep, dopo la dissipa-

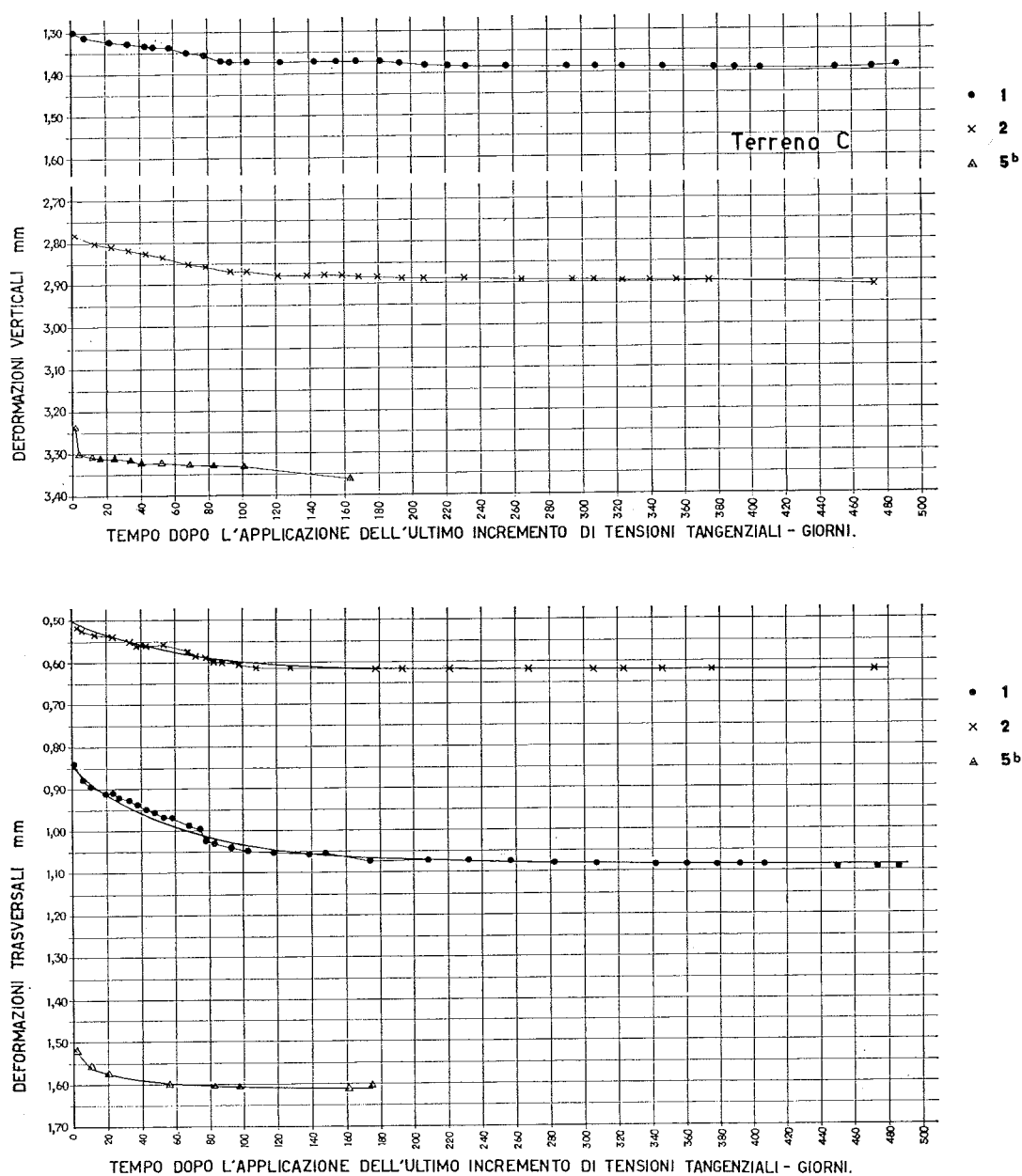


Fig. 3

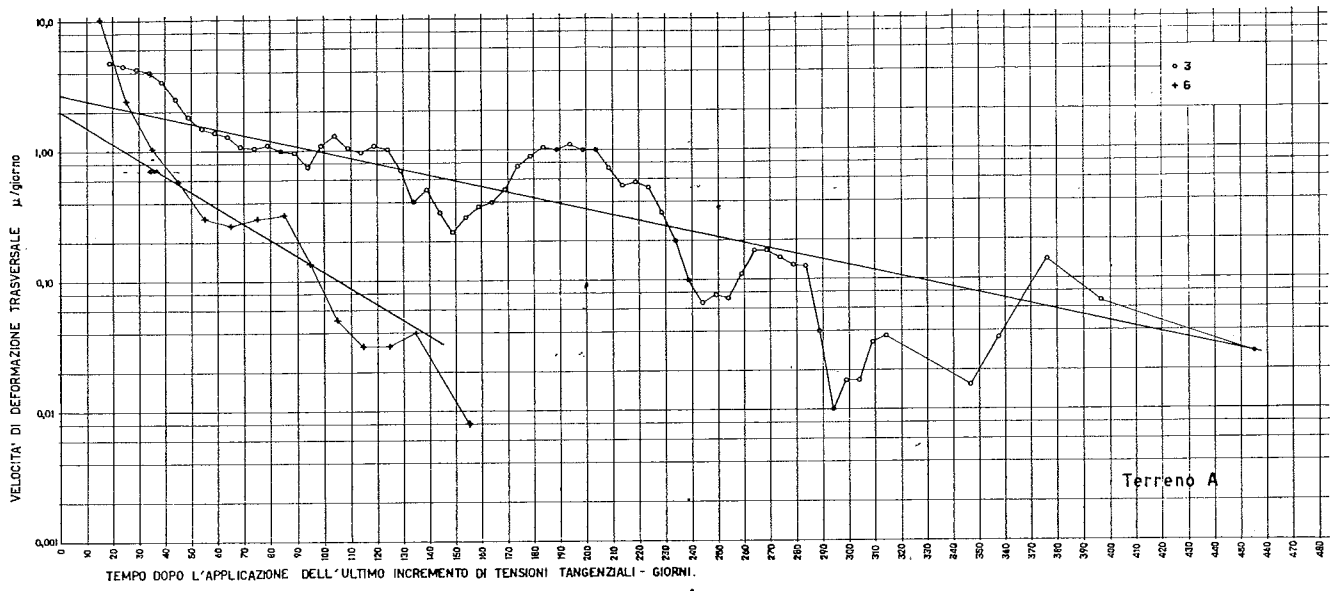


Fig. 4

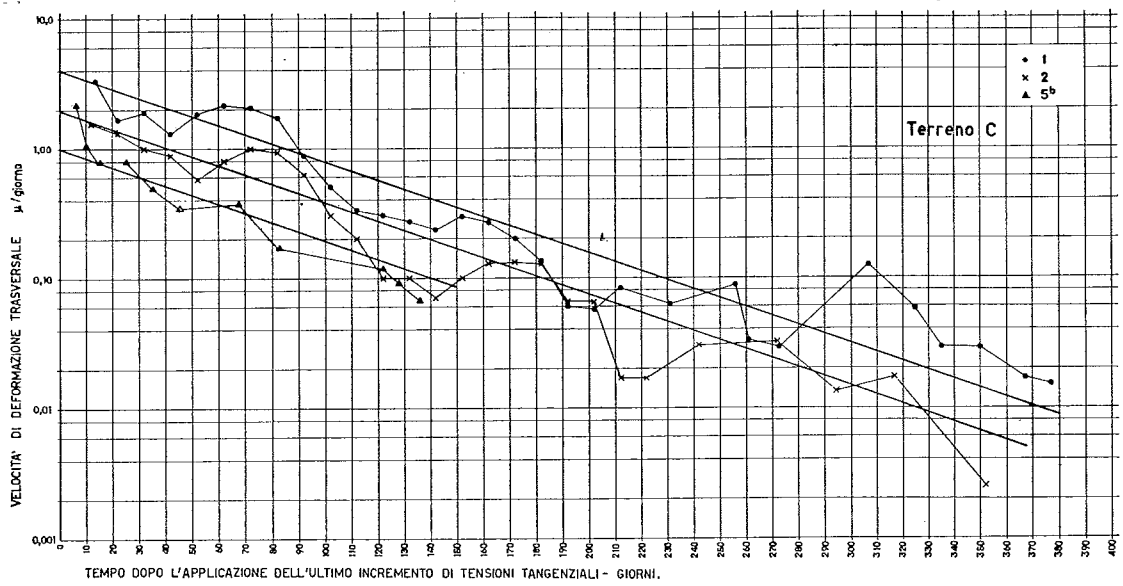


Fig. 5

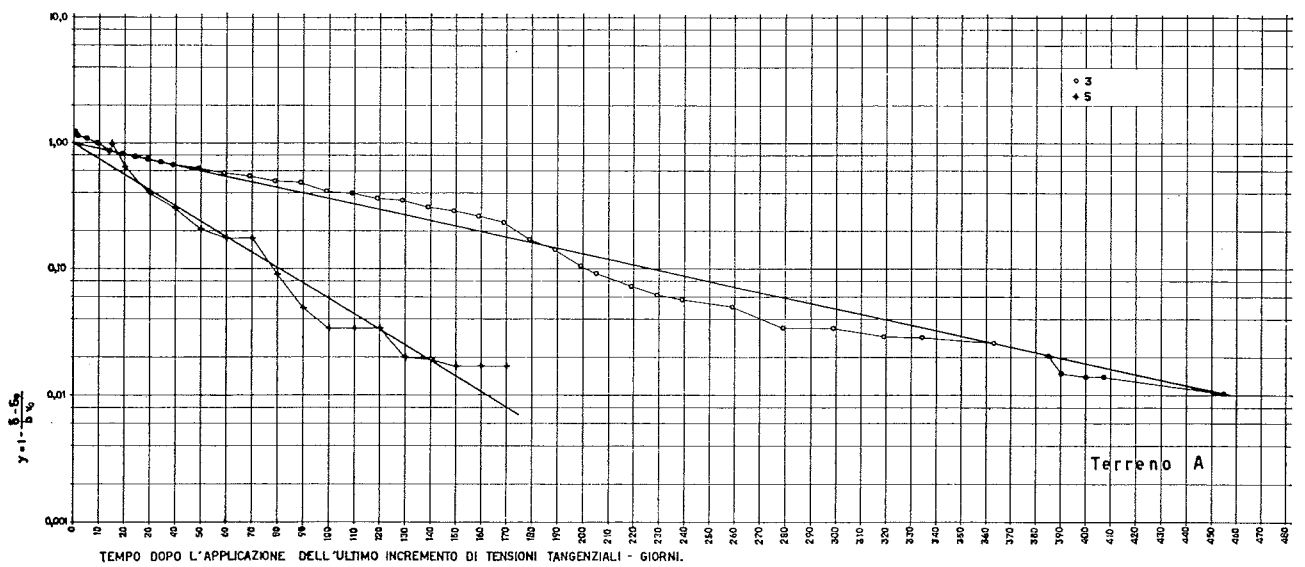


Fig. 6

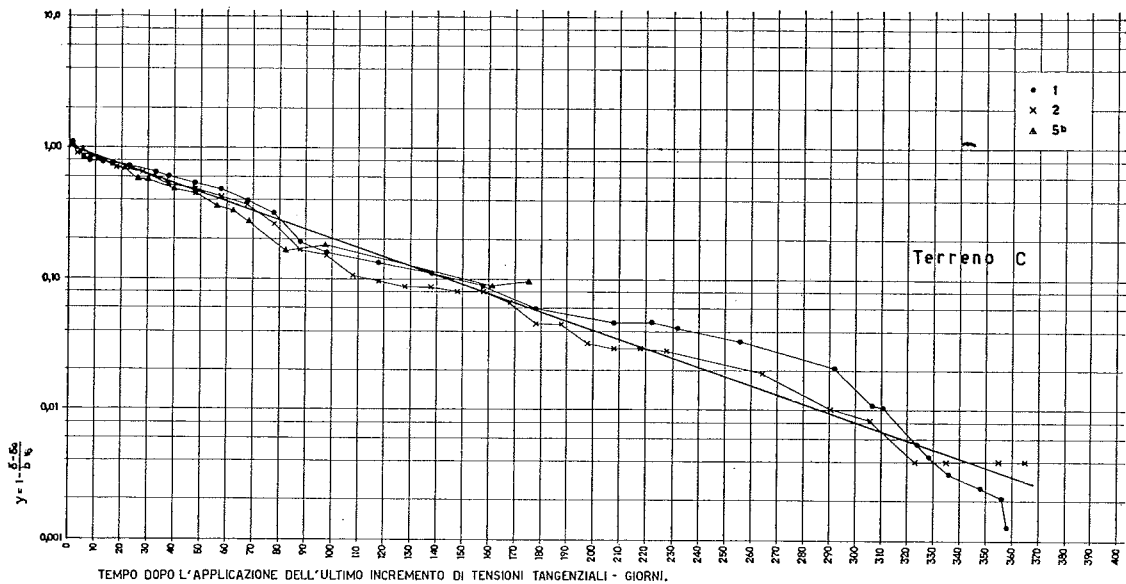


Fig. 7

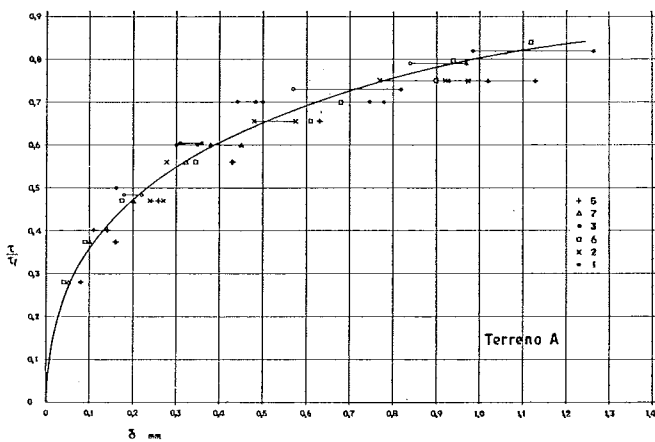


Fig. 8

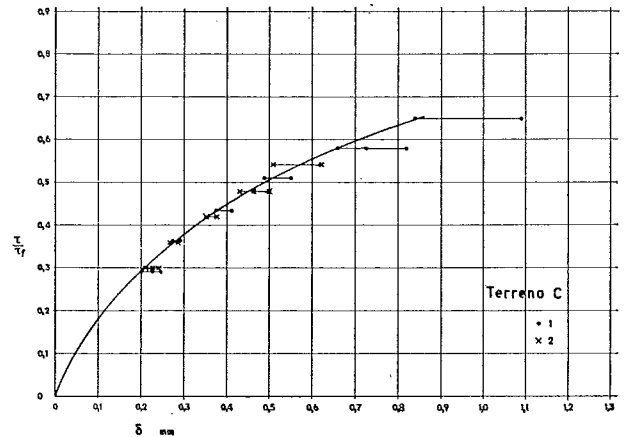


Fig. 9

zione della pressione interstiziale indotta dalla applicazione delle tensioni tangenziali, le semplici leggi reologiche dedotte per il comportamento a lungo termine non appaiono applicabili. In effetti le esperienze di MURAYAMA e SHIBATA [1964] suggeriscono la validità di un modello viscoso non lineare per rappresentare il comportamento di terreni argillosi in tempi più brevi, dell'ordine di qualche giorno.

Si deve tuttavia, rilevare che nelle prove della serie III, dove la tensione normale è stata ridotta contemporaneamente all'applicazione di quella tangenziale, e nelle prove della serie I, dove fu applicato un piccolo incremento di tensione tangenziale dopo un lungo intervallo di tempo, questo fenomeno non apparve e, dopo la consolidazione iniziale, le deformazioni procedettero in accordo

alle leggi che descrivono il comportamento a lungo termine.

5. Confronto con i risultati di altre prove creep.

Contemporaneamente a questa ricerca, alcune prove creep in celle triassiali sono state eseguite all'Imperial College su altri campioni del terreno A, e recentemente pubblicate [LOVENBURY, 1969, BISHOP e LOVENBURY, 1969].

Le apparecchiature di prova [BISHOP, 1966] e le tecniche impiegate hanno permesso ai ricercatori di studiare altri aspetti del comportamento del terreno.

Dal confronto dei risultati ottenuti nelle esperienze sul creep del terreno A, in prove triassiali e



Fig. 10

di taglio diretto, sembra comunque che il terreno abbia lo stesso comportamento reologico indipendentemente dal tipo di prova. In effetti le relazioni tra la velocità di deformazione e il tempo osservate nelle prove triassiali seguono la stessa espressione analitica ricavata dalle prove di taglio diretto, con le stesse oscillazioni e circa lo stesso valore del tempo di ritardo b (fig. 10).

6. Conclusioni.

Nei limiti di una descrizione empirica del comportamento dei terreni esaminati, quale può ottenersi dalle semplici esperienze eseguite, sembra possibile distinguere due differenti periodi nella loro deformazione per creep, prescindendo dagli effetti della pressione interstiziale indotta dalla variazione delle tensioni applicate.

Nel primo, di una durata massima di circa 20 giorni, si osserva un comportamento reologico complesso, ed una viscosità non lineare, forse dovuti a modifiche strutturali del terreno.

Nel secondo periodo, che si estende per l'intera durata delle misure effettuate, talvolta maggiore di

400 giorni, un semplice modello di Kelvin rappresenta con buona approssimazione l'andamento delle deformazioni nel tempo.

Questo comportamento sembra confermato dai risultati di prove creep, eseguite in speciali apparecchiature triassiali sui medesimi terreni.

BIBLIOGRAFIA

- BISHOP A. W. (1966) - *The strength of soils as engineering materials*. Sixth Rankine Lecture. Géotechnique vol. XVI.
- BISHOP A. W., LOVENBURY H. T. (1969) - *Creep characteristics of two undisturbed clays*. VII Int. Conf. S.M.F.E., Mexico.
- GEUZE E. C. W. A. (1964) - *Rheological and mechanical models of saturated clay particle system*. Proc. Symposium IUTAM. Rheology and Soil Mechanics.
- GEUZE E. C. W. A., TAN T. K. (1953) - *The mechanical behaviour of clay*. A.S.T.M. Spec. Publ. 361.
- LOVENBURY M. T. (1969) - *Creep characteristics of London clay*. Ph. D. thesis, University of London.
- MURAYAMA S., SHIBATA T. (1961) - *Rheological properties of clays*. V Int. Conf. S.M.F.E., Paris.
- MURAYAMA S., SHIBATA T. (1964) - *Flow and stress relaxation of clays*. Proc. Symposium IUTAM. Rheology and Soil Mechanics.
- SUKLJE L., VIDMAR S. (1961) - *A landslide due to long term creep*. Paris, V Int. Conf. S.M.F.E.

SUMMARY

Creep behaviour of undisturbed clays in shear box tests of long duration.

In recent years the creep of clayey soils has been studied by many investigators (See f.i. Suklje, Vidmar 1961 Murayama, Shibata 1961, 1964; Geuze, Tan 1953; Geuze, 1964) Theoretical models have been developed to express the rheological behaviour of clays and it has been found that

they fit well the experimental data of creep tests.

However in these investigations the duration of the tests has generally been less than a few days, and very limited information is available about the creep of clayey soils for much longer periods.

Therefore the study of the movements of an old structure moved the A. to investigate, in very long shear tests, the behaviour of the soils involved in this problem.

Actually the results which are presented in the following, are not derived from a systematic research on creep of soils, but simply from a series of tests made on undisturbed samples with the limited aim of looking for a qualitative description of the behaviour of the soils tested, in constant shear stress conditions.

Very simple test arrangements were used. Taking account of the natural properties of soils of lagoon origin like those tested, and of their well-known dishomogeneity and anisotropy, no attempt has been made either of performing more sophisticated but conceptually more satisfactory tests or of looking for a theory of creep behaviour.

However, the results which have been obtained seem to justify the validity of a very simple rheological model of the behaviour of soils in the examined conditions, and may serve as a basis for a more relevant and rational theory.

Three undisturbed samples of clayey soils were taken by means of a large stationary piston sampler, from the same borehole, in a lagoon deposit of the quaternary age. The water table is about 1 m below ground level.

Soil A is a high plasticity normally consolidated clay with a small fraction of organic matter. The sample was taken at a depth of 19 m.

Soil B is a medium plasticity over-consolidated silty clay: the sample was taken at a depth of 21,50 m.

Soil C is a low plasticity slightly over-consolidated clayey silt: the sample was taken at a depth of 28 m.

Grain size distribution of the three samples are shown in fig. 1. Index properties and mechanical characteristics are reported in table I, together with the vertical effective stresses acting in the field.

Mechanical characteristics of the samples were thoroughly investigated. Furthermore the comparison of the results obtained in each type of test, from samples taken in different boreholes at the same level helped to achieve a comprehensive knowledge of the mechanical properties of the soils studied.

Undrained strength was determined by unconfined compression, triaxial and vane tests. Shear strength parameters in terms of effective stresses were measured by means of consolidated undrained triaxial compression tests and drained direct shear tests.

The creep tests were performed in a stress-controlled direct shear apparatus, where the normal and shear stresses are applied by means of dead weights. The boxes had either a square section of 60×60 mm or a circular one, with a diameter of 79,8 mm.

Eight of these boxes were used. They were supported by a heavy iron frame which was located in the basement of an old stone building, where small temperature and humidity variations occur.

Average room temperature was 20°C with a daily fluctuation of less than $\pm 15^\circ\text{C}$ and a seasonal one of $\pm 25^\circ\text{C}$.

The specimens were consolidated in uniaxial strain conditions: each increment of load was maintained for 2-3 days, a time which largely exceeds the duration of full primary consolidation.

Three different procedures were followed for the application of the shear stresses. In a first series of tests (I) small increments of horizontal loads were applied at different time intervals until the established final value of shear stress was reached. Then this stress state was maintained for a very long time (up to 580 days). In a second series of tests (II) the rate of shear stress application was increased by reducing

the intervals of horizontal load increments to a smaller value (8-48 hours).

In the last series of tests (III), the final value of the shear stress was applied in one step and at the same time the vertical load was reduced.

At the end of the observation period of the creep behaviour in some tests the shear stresses were wholly removed; in some other tests the normal stress was slowly reduced, step by step, in some days, until failure of the specimens occurred.

A synopsis of the creep tests performed is presented in table 2.

From the first tests performed (series I) it appeared that the rate of deformation of samples quickly decreased after the application of a stress increment, but nonetheless more than one month later the samples continued to flow in a significant way.

In these tests, a constant value of shear stress was maintained for one month, and subsequently increased by a small amount. This procedure possibly had some influence on the behaviour of the sample in the first stage of the second period.

However three tests of serie I (two on soil C and one on soil A) were carried out by maintaining the last level of shear stress for more than 400 days.

Taking into account the first results, series II was started on samples of soil A. In these tests the established value of shear stress was reached in 5-8 days and then kept constant. A stronger influence of consolidation effects than in previous tests appeared. Vertical and horizontal deformations of the samples in the first days after the application of the final value of shear stress were larger.

Therefore the testing procedure of series III of tests was devised to avoid these effects. Based on the void ratio variations which occurred in the samples of soil C in the first 3 days after the application of the shear stress increments, an approximate value of the reduction of normal stress was determined, which had to be applied to the sample at the same time of the shear stress, in order to reduce any consolidatoin effect to a minimum.

Two tests, of this type were made on samples of soil C. The applied shear stress was $1,35 \text{ Kg/cm}^2$ for both. The normal pressure was reduced from $4,0$ to $3,6 \text{ Kg/cm}^2$ in one test and from $4,0$ to $3,0$ in the other one. A marked consolidation followed the application of the shear stress in the first test; a much smaller effect was observed in the second one.

The results of the three series of tests performed, however, can be examined at the same time as, in respect to long-term behaviour, all the samples seem to conform to the same laws.

Taking into account the theoretical difficulties of establishing the effective states of strain which occur in direct shear tests, the behaviour of the samples has been described in terms of measured deformations instead of pure strains.

In figs 2 and 3 horizontal deformations observed in some typical tests on Soil A and Soil C, are plotted against time, in a linear scale. From these and the subsequent diagrams it seems possible to distinguish three typical periods in the behaviour of the samples after the application of a constant shear stress.

In the first period during 2-3 days, the rate of deformation of the samples was mainly controlled by the initial raising of the pore pressure. The testing procedure followed in series II reduced but did not eliminate this effect.

In a second period, having a duration of 3 up to a maximum of 24 days, high rates of deformation occurred, but taking into account the consolidation characteristics of the samples and drainage conditions of the tests, it should be excluded that the initial raising of the pore pressure could be the controlling factor of the soil behaviour.

In a subsequent period, which covers the whole duration of the tests, the rheological behaviour of all the samples appears quite well described by a simple *Kelvin's body*.

If G is the modulus of the elastic body and C the viscosity constant of the perfect (Newtonian) viscous body assembled in parallel, by referring to the present case, the equations governing the flow at constant stress can be expressed as follows:

$$v = v_0 e^{-\frac{t}{b}} \quad \text{and} \quad \delta = \delta_0 + b v_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{b}} \right)$$

where δ is the deformation of the model, $v = \frac{d\delta}{dt}$ is the deformation rate, δ_0 and v_0 are their value at time $t = 0$ and b is the retardation time $b = \frac{C}{G}$.

Therefore, for this model to be valid, by plotting the rates of deformation in a logarithmic scale against time, it should be possible to fit the experimental points with a linear relationship. Actually in all the tests performed the observed rates of deformation appear to fluctuate around a relationship of this type (figures 4, 5).

As was said before, however, this model is no valid at the beginning of the creep process, when the strain rates are much higher. Leaving this fact apart, the theoretical initial value of deformation δ_0 and flow rate v_0 have been calculated by extrapolating the above mentioned relationship to the moment of the last shear stress application.

Then the validity of the model in describing the soil behaviour appears with better evidence in the diagrams of figures 6, 7, where the effective deformations of the samples have been considered, instead of the flow rate; the values of

$$y = 1 - \frac{\delta - \delta_0}{b v_0}$$

in a logarithmic scale are plotted against time and compared with the theoretical relationship. A significant concordance appears for the whole duration of the tests. The same relationship has been reported in the linear diagrams of figures 2 and 3.

The observed fluctuations of the flow rate could be partly explained by the seasonal temperature variations. However a comparison of the temperature records with the deformation rate values does not suggest a full connection of the two facts.

The values of the parameters of the flow law, b and v_0 for the various tests, are reported in table 2. As one could expect, the theoretical initial deformation rate is strongly influenced by the testing procedure followed. Parameter b , on the contrary, which expresses the ratio between viscosity and elasticity constants of the rheological model should have an intrinsic value.

This parameter does not seem to be influenced by the water content in soil C, which has a small clay fraction; in soil A, on the contrary, which has high clay content, b increases when water content decreases.

It can also be noticed that the deformations of the samples during the very long duration of flow, if compared with the initial values, are really significant. Putting together the results of many direct shear tests, some of which were brought to failure, the stress-deformation curves for the two soils have been examined (figures 8, 9). They clearly show the importance of the delayed deformations in the mechanical characteristics of the two soils.

Another question initially suggested the present work: namely whether after a very long period of flow an increase of strain rate could appear, as a consequence of structural rearrangements, which eventually could bring the soils to failure, for a lower shear stress than in shorter tests. This fact never happened with the soils tested. Furthermore, the shear strength determined at the end of the creep tests did not significantly differ from the values initially observed in common short term tests.

In the second period of flow, after the pore pressure dissipation following the application of the shear stress, the simple rheological laws which hold for the long term behaviour do not appear to be adequate. In fact, the experiments of Murayama and Shibata [1964] support the validity of a non linear model for shorter periods of observation, of the order of a few days.

It could be noticed, however, that in tests of series III where the normal stress was reduced at the same time as the shear stress application, and in tests of series I, where a very small increment of shear stress was applied after a first stage of deformation, this phenomenon did not appear, and, after the initial consolidation, flow occurred in accordance with the laws which hold for long-term behaviour.

In the same time of the reported investigation, creep tests in triaxial apparatus were carried out at the Imperial College on other undisturbed samples of soil A, some results of which have been very recently published [Lovenbury, 1969].

The more refined apparatus which has been used [Bishop 1966] allowed investigators to focus their attention mainly on the structural behaviour of the tested soils.

However, by comparing the results of the creep tests on soil A performed in the triaxial and direct shear tests, it appears that the soil has the same rheological behaviour.

Actually the strain rate-time relationships observed in triaxial tests follow the analytical expression derived from direct shear tests, with similar fluctuations and about the same value of retardation time b (fig. 10).

Within the limits of an empirical description of the behaviour of the soils tested, as can be obtained from the very simple tests performed, it seems possible to distinguish two different stages in their creep flow, not taking into account the effects of the pore pressure set up by the stress application.

In the first one, which had a maximum duration of about 20 days, complex rheological laws and a non Newtonian viscosity hold, possibly because of a structural rearrangement of the soil.

In the second stage, which extends itself for the whole period of observation, sometimes longer than 400 days, a simple *Kelvin's body* reproduces fairly well the flow law. This behaviour appears to be confirmed by the results of other creep tests, which were carried out in special triaxial apparatus.