

**Calcolo delle filtrazioni attraverso dighe di terra fondate su terreni permeabili.**

W. F. KONDRATIEW - Idrotekhniceskoje Stroitelstwo, Giugno 1968.

L'A. affronta il problema dei moti di filtrazione attraverso rilevati a sezione omogenea aventi coefficiente di permeabilità  $K_d$  e poggianti su terreni permeabili di spessore  $T$  aventi coefficiente di permeabilità  $K_0$ .

L'A. sostituisce la sezione trapezoidale della diga con un'altra nella quale il paramento di monte risulta verticale; semplificazione questa ammessa dalle norme statali russe e che porta a risultati tanto più attendibili quanto più preciso è il calcolo della lunghezza di filtrazione virtuale <sup>(1)</sup>.

$$(1) \quad L_p = L + \Delta L.$$

Conoscendo  $L_p$  la portata  $q$  attraverso la diga per unità di lunghezza può essere stimata con sufficiente precisione mediante la seguente espressione:

$$(2) \quad q = K_d \cdot \frac{H_1^2 - h_0^2}{2 L_p} + K_0 \cdot T \frac{H_1 - H_2}{L_p - 0,88 T}$$

essendo:

$\Delta L$  = larghezza del rettangolo  $a b c d$  nell'ambito del quale le perdite di carico idraulico sono pari a quelle che avvengono nel corso della filtrazione attraverso il paramento reale (vedi figura);

$h_0$  = distanza in verticale tra la linea di saturazione e l'inizio del drenaggio orizzontale.

Allo scopo di determinare il valore  $\Delta L$  l'A. ha condotto un grande numero di esperimenti su modello sfruttando il ben noto principio di analogia elettrica.

L'elaborazione analitica dei dati sperimentali ottenuti da queste indagini

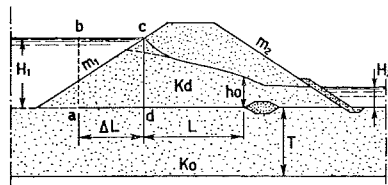
<sup>(1)</sup> Il significato dei simboli è illustrato in figura.

ha permesso di formulare la seguente espressione:

$$\Delta L = \frac{H_1}{1 + H_2/H_1} + \frac{1}{m_1} \cdot 0,5 \frac{K_0}{K_d} \cdot \frac{T}{H_1 + T}$$

essendo:

$m_1$  = scarpata del paramento di monte.



Con i valori di  $\Delta L$  ricavati dalla formula sopra esposta si ottengono dalla (2) valori di  $q$  che sono in buon accordo con i dati sperimentali per un vasto campo dei valori di  $T/H_1$ ,  $H_2/H_1$ ,  $K_0/K_d$  e  $m_1$ .

Nel caso di  $T = 0$  (fondazione impermeabile) e  $H_2 = 0$  la (3) concorda con la formula teorica data da MIKAILOV [1960]:

$$(3) \quad \Delta L = H_1 \cdot \frac{m_1}{1 + 2 m_1}$$

Inoltre dagli studi condotti da KONDRATIEW è risultato che la maggioranza delle formule usate nell'Unione Sovietica per il calcolo delle filtrazioni attraverso le dighe in terra, ha validità limitata ad un ristretto campo di valori di  $H_1/T$ ,  $H_2/H_1$  e  $K_0/K_d$ .

La formula di LIU SJUAN [1958]:

$$(4) \quad \frac{\Delta L}{H_1} = \frac{\sigma \cdot \alpha_3 + \alpha_2 \cdot \sigma}{\sigma + \alpha_1}$$

dove:  $\sigma = \sqrt{\frac{K_0}{K_d} \frac{H_1 - H_2}{T}}$

$$\alpha_1 = 2 m_1 \frac{T}{m_1} + \frac{1,32}{m_1} - 1$$

$$\alpha_2 = \frac{m_1}{1 + 2 m_1} \left( 1 - \frac{H_2}{H_1} \right)$$

$$\alpha_3 = m_1 \left( 1 - \frac{H_2}{H_1} \right) + 0,4 \frac{T}{H_1}$$

che con piccole modifiche fa parte delle norme statali russe, si discosta notevolmente dalla realtà per i valori di  $K_0/K_d \geq 10$  e per valori di  $K_0/K_d < 1$  fornendo valori di  $\Delta L$  notevolmente in difetto <sup>(2)</sup>.

La formula raccomandata da OLEJNIK [1965] valida per  $K_0/K_d \geq 1$  e  $H_2/H_1 = 0$

$$(5) \quad \frac{\Delta L}{H_1} = 0,5 \sqrt{\frac{K_0}{K_d} \frac{T}{H_1}}$$

conduce invece a valori di  $\Delta L$  in eccesso per  $K_0/K_d > 10$ .

Relativamente bene esce da questo confronto il procedimento grafico suggerito da SRIESTAROV [1962] che per motivi di spazio non può essere qui riportato.

In conclusione l'impiego delle formule (2) e (3) per il calcolo delle filtrazioni attraverso le dighe a sezione omogenea appare sostenuto da una buona evidenza sperimentale.

(Michele Jamiołkowski)

BIBLIOGRAFIA

MIKAILOV G. K. (1960) - *Filtrazioni attraverso le dighe poggianti su terreni impermeabili*. Idrotecnica e Meliorazia.

LIU SJUAN (1958) - *Filtrazioni attraverso le dighe poggianti su terreni permeabili ecc.* Idrotekhniceskoje Stroitelstwo n. 8.

OLEJNIK R. (1965) - *Calcolo delle filtrazioni attraverso dighe in terra*. Idrotekhniceskoje Stroitelstwo n. 1.

SESTIAKOV W. M. (1962) - *Calcolo delle filtrazioni attraverso le dighe in terra poggianti su uno strato permeabile*.

<sup>(2)</sup> Si avverte che nel confrontare le altre formule con quella di Kondratiew è necessario

diminuire il rapporto  $\frac{\Delta L}{H_1}$  ottenuto dalle prime di  $0,4 T/H_1$ .

**Resistenza a taglio a lunga scadenza (creep) dei terreni.**

S. S. VIALOV, N. K. PEKARSKAJA - OSNOVANIJA, Fundamenti i Mekanika Gruntov. Giugno 1968.

Gli AA. esaminano l'evoluzione della resistenza al taglio dei terreni nel tempo facendo particolare riferimento ai fenomeni di scorrimento plastico (creep) sotto un carico costante.

In particolare, gli AA. si sono prefissati lo scopo di indagare sul comportamento nel tempo di provini di terreno argilloso saturo soggetti a sforzi di taglio costanti. A tale scopo è stata eseguita una serie di prove utilizzando apparecchio di taglio « puro » ed apparecchio di taglio a torsione tipo Hvorslev, ed agendo su terreni argillosi rimaneggiati ed indisturbati provenienti da varie località dell'U.R.S.S. Durante l'applicazione degli sforzi di taglio il volume del provino veniva mantenuto costante; in altre parole, le prove erano eseguite in condizioni non drenate.

Dai risultati di queste prove, alcuni esempi delle quali sono esposti nelle figure 1-3, gli AA. traggono le seguenti conclusioni:

1) Per tutti i provini si può osservare che esiste un valore di  $\tau$  oltre il quale si verificano fenomeni di scorrimento plastico progressivo che conducono a rottura (vedi curve 1 ÷ 5 e 10 ÷ 13 nella figura 1).

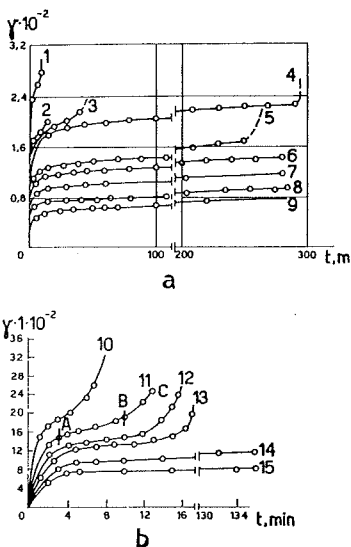


Fig. 1. - Curve deformazioni-tempo di provini di argilla;  $\gamma$  rappresenta la deformazione angolare; a) argilla di consistenza semisolidata; b) argilla di consistenza plastica.

Il valore massimo di  $\tau$  per il quale non si manifestano fenomeni di scorrimento progressivo, determina la resistenza al taglio del materiale a lunga scadenza  $\tau_{\infty}$ .

2) Sulla base dei dati esposti nella fig. 2 si nota:

$$\frac{\tau_{\infty}}{\tau_0} = 0,5 \div 0,55 \text{ (materiali aventi consistenza plastica);}$$

$$\frac{\tau_{\infty}}{\tau_0} = 0,45 \div 0,50 \text{ (materiali aventi consistenza semisolidata).}$$

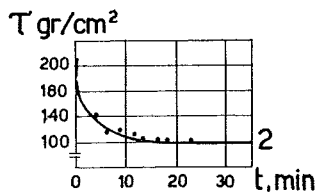


Fig. 2. - Evoluzione della resistenza al taglio nel tempo; 1 = argilla avente consistenza semisolidata; 2 = argilla avente consistenza plastica.

3) Sulla curva deformazione tempo di un provino soggetto ad una sollecitazione di taglio  $\tau > \tau_{\infty}$ <sup>(1)</sup>, gli AA. distinguono i seguenti tre tratti caratteristici:

Tratto 0 ÷ A - deformazioni elastiche e « creep » primario;

Tratto A ÷ B - « creep » stazionario ( $\frac{d\gamma}{dt} \approx \text{costante}$ );

Tratto B ÷ C - « creep » progressivo ( $\frac{d\gamma}{dt} \rightarrow \infty$ ) che termina con la rottura del provino.

4) Allo scopo di indagare sul significato fisico dei tre tratti sopra distinti sono state eseguite al microscopio elettronico fotografie delle sezioni

sottili del materiale in corrispondenza dei vari tratti della curva deformazione-tempo, confrontandole con analoghe fotografie fatte prima dell'applicazione dello sforzo di taglio.

Da questo confronto si deduce quanto segue:

- Nella prima fase (« creep » primario) non si osservano sensibili variazioni della struttura interna del materiale. I cambiamenti che avvengono conducono all'eliminazione dei difetti interni della struttura ed alla formazione di nuovi legami fra le particelle dei vari minerali argillosi.

In conclusione a questa fase corrisponde un *incremento* della resistenza del materiale.

- Nello stadio di « creep » stazionario avvengono irreversibili modificazioni plastiche della struttura interna connesse alla distruzione di alcuni legami interni e con orientamento delle particelle in direzione dello scorrimento in corso.

D'altra parte i fenomeni sopra descritti vengono compensati dalla realizzazione dei nuovi legami e dalla chiusura di alcune microfessure.

Alla fine di questo stadio si raggiunge una situazione d'equilibrio e di conseguenza la velocità di deformazione resta costante nel tempo.

- Nella terza fase (« creep » progressivo) oltre al completamento dell'orientamento delle particelle ed al progredire delle rotture dei legami interni, si formano fessure interne che collegandosi distruggono la continuità del materiale e ne provocano la rottura.

5) Nel corso delle prove condotte con l'apparecchio di taglio puro si è osservato che campioni sottoposti in precedenza per alcune ore ad uno sforzo di taglio  $\tau < \tau_{\infty}$ , sotto l'effetto di ulteriori incrementi di  $\tau$  rivelavano resistenze molto maggiori rispetto a provini dello stesso materiale non sottoposti a tale sollecitazione. Essendo le prove state condotte in assenza di drenaggio, tale incremento di resistenza può essere attribuito solo a modifiche della struttura interna del materiale.

A parere dello scrivente questo fenomeno è paragonabile a quelli già descritti da BJERRUM (*aging*) e CRAWFORD (*quasi preconsolidation pressure*).

In conclusione gli AA. arrivano a constatare che i fenomeni di « creep » possono, a secondo della fase di de-

(1) Vedi ad es. curva n. 11 in fig. 1.

formazione, determinare l'aumento o la diminuzione della resistenza al taglio del terreno. Il rapporto reciproco tra i due fenomeni dipende dai due seguenti fattori:

le deformazioni conseguenti, limitatamente al caso del problema piano, può essere effettuata col metodo degli elementi finiti con l'impiego di un calcolatore elettronico. Nell'articolo si espon-

ad un'analisi più precisa, che tenga conto delle modalità costruttive del rilevato. È sufficiente che la schematizzazione in elementi finiti sia ordinata in corsi orizzontali per consentire di valutare l'effetto della stesa di successivi strati di materiale. Il calcolo delle tensioni e delle deformazioni si ripete allora per ogni aggiunta di un corso di elementi triangolari alti, ad esempio, un decimo del rilevato finito. Una maggiore suddivisione si è dimostrata praticamente inutile.

Gli AA. mostrano che le tensioni verticali e orizzontali sul rilevato finito, calcolate con questo metodo, non differiscono sensibilmente da quelle che si ricavano con il calcolo in un'unica fase, applicando contemporaneamente i pesi corrispondenti alla costruzione finita, come se questa avvenisse istantaneamente. Ma le deformazioni, soprattutto quelle verticali, che si hanno nei due casi sono molto differenti.

È particolarmente interessante la rappresentazione degli stati di tensione in funzione dell'altezza di materiale sovrastante il punto considerato, che gli AA. hanno ricavato per un rilevato tipo di una diga in terra. I risultati ottenuti possono facilmente estendersi ai rilevati omogenei di forma leggermente diversa.

Con gli stessi metodi di analisi è stato anche studiato l'effetto della deformabilità del terreno di fondazione, e si è constatata la sensibile alterazione delle tensioni orizzontali nel corpo del rilevato e delle deformazioni orizzontali e verticali.

Nell'articolo viene infine esaminata la possibilità di tener conto della non linearità delle relazioni sforzi-deformazioni delle terre. Con il metodo di analisi incrementale, applicato per approssimare l'effetto delle procedure costruttive, è possibile modificare successivamente i moduli di deformabilità del materiale in relazione allo stato di sollecitazione che via via viene prodotto nella costruzione del rilevato.

È da notare che tutte le analisi eseguite si riferiscono alle tensioni totali e non a quelle efficaci.

L'introduzione delle pressioni interstiziali nel metodo di calcolo adottato, come suggeriscono gli AA., non presenta particolari difficoltà e permetterebbe di estendere il campo di applicazione.

(G. Calabresi)

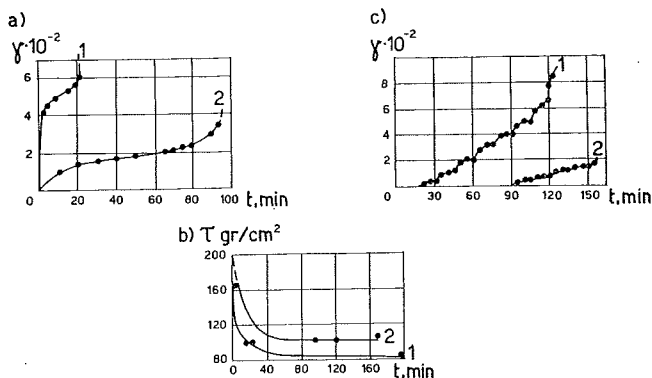


Fig. 3. - a) curve deformazione-tempo; b) evoluzione della resistenza al taglio nel tempo; c) curve deformazione-tempo con una graduale applicazione di  $\tau$ : 1 = provino senza precarico; 2 = provino con precarico.

$$a) \frac{\tau}{\tau_{\infty}} \text{ dove } \tau \leq \tau_{\infty};$$

b) velocità d'applicazione dei carichi.

L'interesse dell'articolo è da ricercare, a giudizio di chi scrive, non tanto nei risultati sperimentali ottenuti quanto nella tendenza di conferire ad ogni fase di « creep » un significato fisico collegandolo con la dinamica della struttura interna del materiale.

#### Simboli

$\tau_0$  = resistenza al taglio in assenza di drenaggio determinata in un tempo standard impiegato normalmente nei laboratori ( $\approx 3 \div 10$  minuti);

$\tau_{\infty}$  = resistenza al taglio a lunga scadenza in assenza di drenaggio;

$\gamma$  = velocità di deformazione angolare ( $t^{-1}$ ).

(Michele Jamiolkowski)

#### Analisi delle tensioni e delle deformazioni in un rilevato.

R. W. CLOUGH, R. J. WOODWARD: *Analysis of embankment stresses and deformations*. Journ. Soil Mech. Div., Proc. A.S.C.E., luglio 67.

L'analisi delle tensioni indotte all'interno di un rilevato dal suo peso e del-

gono i risultati di una ricerca effettuata nella Università di California, impiegando questa tecnica, al fine di:

- 1) valutare l'effetto della costruzione graduale del rilevato sulle tensioni e le deformazioni, in confronto ai risultati che si ottengono nell'ipotesi di carico immediato;
- 2) studiare l'effetto della deformabilità del terreno di fondazione;
- 3) tener conto in forma appropriata della non linearità delle relazioni sforzi-deformazioni dei terreni, per uno specifico caso, e confrontare le deformazioni così ottenute con quelle effettivamente misurate in una diga.

Il metodo di analisi applicato consiste nell'assimilare il corpo di un rilevato a un insieme di elementi elastici finiti, in forma di piastre triangolari, interconnessi ai vertici. Per conservare la congruenza fra i bordi di elementi adiacenti si assume che le deformazioni all'interno di ciascun elemento varino linearmente nelle due direzioni.

Con queste ipotesi si determinano per ciascun elemento le relazioni fra le forze applicate ai vertici e gli spostamenti conseguenti. Infine si ricavano le stesse relazioni per l'insieme di tutti gli elementi. In tal modo la congruenza è soddisfatta nell'intero sistema e si ha l'equilibrio all'interno di ciascun elemento. Non si verifica, invece, l'equilibrio lungo i lati di ciascun elemento ma è assicurato l'equilibrio dell'intero sistema delle forze nodali.

Questo metodo si adatta facilmente