

# La permeabilità significativa nel processo di drenaggio del fianco a monte di una diga di terra\*

G. CUSMANO, G. UMITA' \*\*

**SOMMARIO:** Il regime di pressioni neutre che si desta nel fianco a monte delle dighe di terra durante la manovra di svasso dei serbatoi dipende principalmente, per i mezzi indeformabili, dal valore del coefficiente di permeabilità del materiale. E' noto, tuttavia, che la scelta del valore di questo coefficiente da introdurre nei calcoli, presenta talvolta notevoli difficoltà perché i dati che si ottengono con le usuali esperienze su campioni preparati in laboratorio non possono sempre trasferirsi direttamente al mezzo poroso reale, il quale si presenta in genere non omogeneo e anisotropo nei riguardi della permeabilità. Per superare questo ostacolo gli AA. propongono un procedimento sperimentale per tentativi, che si basa sul confronto dei risultati di esperienze di svasso eseguite su un modello fisico, costituito di un rilevato, e su di un modello analogico tipo Hele-Shaw. Il valore del coefficiente di permeabilità si ottiene dalla relazione che esprime la corrispondenza tra i fenomeni che si verificano nei due modelli. Nell'ipotesi che il rilevato sperimentale sia rappresentativo delle condizioni di posa in opera del materiale nel fianco a monte della diga, il valore del coefficiente di permeabilità che si ottiene con il procedimento proposto può considerarsi come il valore significativo ai fini dello studio del processo di drenaggio che si verifica nella diga in fase di vuotamento del serbatoio. Gli AA. illustrano i risultati di una ricerca eseguita sul materiale adottato per la costruzione di una diga in Sicilia. I valori del coefficiente di permeabilità ottenuti con il procedimento proposto, risultano notevolmente superiori a quelli che si deducono dalle usuali prove di laboratorio.

## 1. Premessa

Le condizioni più sfavorevoli per la stabilità del fianco a monte di una diga di terra si verificano di regola durante il fenomeno di svasso del serbatoio.

Per lo studio della condizione critica è necessario valutare preliminarmente lo stato tensionale al quale lo scheletro solido del materiale è sottoposto durante questo processo; ciò comporta di volta in volta una ricerca specifica sull'andamento delle pressioni neutre, che si destano nel materiale per effetto dell'abbassamento del livello dell'acqua nel serbatoio.

Le ipotesi, che spesso si assumono in tale ricerca, riguardano il mezzo poroso, che si considera inizialmente saturo, omogeneo e isotropo nei riguardi della permeabilità, e costituito di uno scheletro solido incompressibile con capillarità

trascurabile; i materiali di contorno, che si suppongono impermeabili e incompressibili; il tipo di processo di moto, che si considera piano.

Se si ammette, inoltre, la validità dell'ipotesi di DUPUIT, il processo di moto risulta retto dalla ben nota equazione di BOUSSINESQ:

$$\frac{k}{2} \frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} = n_0 \frac{\partial h}{\partial t}$$

dove, con riferimento alla fig. 1,  $k$  è il coefficiente di permeabilità del materiale del fianco a monte della diga;  $h(x, t)$  la quota piezometrica relativa all'ascissa  $x$  e allo istante  $t$ ; tale quota, per le ipotesi innanzi poste, coincide con il livello della linea libera.

L'equazione di Boussinesq può risolversi per via analitica solo in casi del tutto particolari e assai semplici per la geometria del mezzo poroso, per le condizioni iniziali del processo e per la legge di variazione del livello del liquido esterno [CURTO G., 1969].

Le soluzioni numeriche sembrano offrire più ampie possibilità [CURTO G., 1972]; tuttavia, non si ha notizia che di queste soluzioni siano state tentate applicazioni sistematiche allo studio del processo di drenaggio.

Per risolvere il problema per via analitica o analitico-numerica alcuni autori hanno proposto metodi approssimati, nei quali si introducono ulteriori ipotesi semplificative, che riguardano, in

(\*) Il presente studio rientra in un programma di ricerche di Geotecnica svolte con il contributo dell'ENEL presso l'Istituto di Ingegneria Geotecnica e Mineraria dell'Università di Palermo. La ricerca è dovuta per l'impostazione generale e per le esperienze di laboratorio su modello Hele-Shaw a Guido Umiltà; per le esperienze in sito e in laboratorio sul materiale per la costruzione del rilevato a Gianni Cusmano.

(\*\*) Dott. Ing. Gianni CUSMANO, STAIG (*Studio Tecnico Applicazioni Idrauliche e Geotecniche*) di Palermo.

Dott. Ing. Guido UMITÀ, Assistente Ordinario presso la Cattedra di Geotecnica della Facoltà di Ingegneria di Palermo.

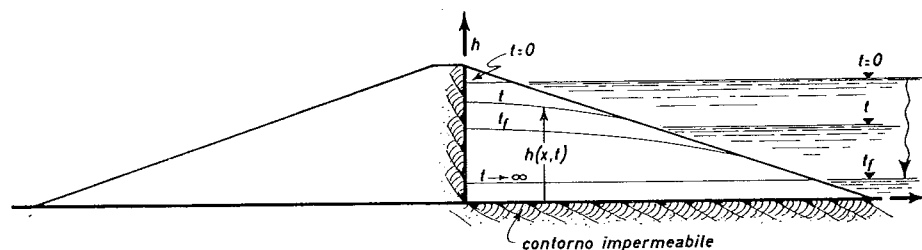


Fig. 1. — Posizione del problema

particolare, la forma della linea di saturazione, che viene assimilata ad un segmento rettilineo [CASAGRANDE A., SHANNON W. L., 1952], ad un tratto di iperbole [NEWLIN C. W., ROSSIER S. C., 1967] o di parabola [DVINOFF A. H., HARR M. E., 1971]. In queste trattazioni il mezzo poroso si suppone in genere di sezione triangolare e l'abbassamento del liquido esterno si considera istantaneo; fa eccezione il procedimento proposto da DVINOFF e HARR, che consente di risolvere anche il caso in cui la legge di vuotamento è di tipo lineare. Si tratta, comunque, di metodi di calcolo che, per le restrizioni imposte dalle ipotesi semplificative, si applicano in pratica solo in casi particolari o per valutazioni di prima approssimazione.

Un procedimento che consente di risolvere il problema in condizioni affatto generali per la geometria del mezzo poroso e per la legge di variazione del livello del liquido esterno, è quello sperimentale che si avvale dei modelli idraulici tipo Hele-Shaw, che, come è noto, sono costituiti di due lastre parallele, tra le quali scorre un olio in condizioni di regime laminare.

In linea di principio, quindi, il problema posto può risolversi con uno dei procedimenti innanzi illustrati.

Nei riguardi delle applicazioni pratiche resta ancora da superare la principale difficoltà, che è quella della scelta del valore numerico del coefficiente di permeabilità che caratterizza il mezzo filtrante nel processo di moto.

L'esperienza insegna, infatti, che le ipotesi della omogeneità e isotropia del mezzo poroso, nei riguardi del coefficiente di permeabilità sono raramente rispettate; ciò avviene, nei materiali posti in opera artificialmente, per numerose ragioni, che possono individuarsi nelle variazioni che localmente si verificano nella composizione granulometrica, nel contenuto d'acqua e nella porosità del materiale, che viene sistemato per strati successivi.

E' noto, inoltre, che per varie ragioni, che non è il caso qui di ricordare, le esperienze di laboratorio vengono effettuate in condizioni diverse da quelle che prevalgono in sito nel singolo caso; i valori di  $k$  che da queste si deducono sono,

quindi, spesso scarsamente significativi ai fini dei calcoli, di cui innanzi.

Il problema più importante che resta da risolvere è perciò proprio quello di valutare quale sia il valore significativo del coefficiente di permeabilità del materiale nelle effettive condizioni in cui si opera, ai fini del particolare problema di svaso che si desidera prendere in esame.

Questo problema è stato risolto nella presente nota con un procedimento sperimentale basato su un modello fisico e su un modello analogico. Il modello fisico è costituito di un rilevato sperimentale sul quale è stata condotta una esperienza di svaso; la medesima esperienza è stata quindi riprodotta in laboratorio su un modello analogico Hele-Shaw. Il valore del coefficiente di permeabilità del materiale del rilevato è stato ottenuto, come si illustrerà nel seguito, dalla relazione che esprime la corrispondenza tra i fenomeni che si verificano nei due modelli.

Le esperienze in sito sono state eseguite presso il cantiere della diga Rubino sul T. Fastaia<sup>(1)</sup>; le esperienze sul modello sono state condotte presso il laboratorio dell'Istituto di Idraulica della Facoltà di Ingegneria di Palermo.

## 2. Il modello fisico

Il materiale impiegato per la costruzione del rilevato è quello adottato per la costruzione del fianco a monte della diga sul T. Fastaia. Esso è costituito di un detrito di falda che si rinviene in grandi quantitativi ai piedi del rilievo di « Montagna Grande », distante poco più di un chilometro dalla stretta. Si tratta di una ghiaia con sabbia, limosa o debolmente limosa, la cui composizione granulometrica, rilevata su numerosi campioni nelle varie fasi di costruzione dell'opera, rientra nella fascia di fig. 2.

Con le usuali tecniche di laboratorio sono state effettuate prove di costipamento su provini del diametro di 300 mm dalle quali si è ottenuto un

(<sup>1</sup>) La diga Rubino sul T. Fastaia è stata costruita nel periodo 1968-72 dal Consorzio di Bonifica del Birgi (Trapani) con il finanziamento della Cassa per il Mezzogiorno.

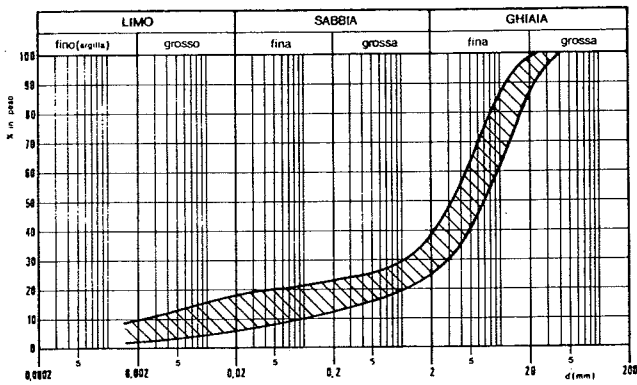


Fig. 2. — Composizione granulometrica del materiale impiegato per il modello fisico.

contenuto d'acqua ottimo di 0,10 ed un peso secco massimo dell'unità di volume di 2,05 ÷ 2,10 ton/mc; la porosità effettiva è risultata prossima a 0,10 nell'intorno dell'ottimo di costipamento.

Sono state altresì eseguite prove di permeabilità, i cui risultati sono riportati nella fig. 3.

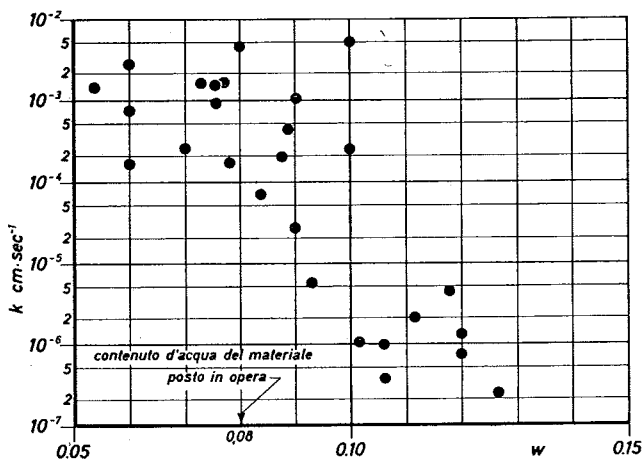


Fig. 3. — Risultati delle prove di permeabilità eseguite in laboratorio sul materiale impiegato per la costruzione del modello fisico.

Dal grafico si osserva che i valori del coefficiente di permeabilità  $k$  sono influenzati in notevole misura dal contenuto d'acqua di costipamento.

to  $w$ ; essi si aggirano intorno a  $10^{-3}$  cm/sec per  $w \leq 0,10$  e si riducono a  $10^{-6}$  cm/sec per  $w \geq 0,10$ .

Si può constatare una notevole dispersione dei risultati sperimentali; in corrispondenza del contenuto d'acqua  $w \cong 0,08$  del materiale posto in opera nel fianco a monte della diga e nel rilevato sperimentale, il coefficiente di permeabilità è risultato variabile da un minimo di circa  $8 \times 10^{-5}$  cm/sec ad un massimo di  $5 \times 10^{-3}$  cm/sec.

Nella fig. 4 si riporta una sezione quotata del rilevato, la cui lunghezza, nella direzione normale al disegno, è di m 20,00.

La costruzione è stata effettuata con il medesimo procedimento seguito per il fianco a monte della diga; il materiale è stato disposto in strati dello spessore iniziale di cm 30 circa e quindi costipato con rullo statico semovente.

Per ogni strato sono state effettuate misure di controllo della composizione granulometrica, dei valori del contenuto d'acqua e del peso dell'unità di volume.

I valori ottenuti mostrano che il rilevato può considerarsi rappresentativo del fianco a monte della diga.

Il rilevato è circondato da un argine di argilla in modo da costituire un piccolo serbatoio; l'argine è munito di uno scarico di fondo costituito di due condotte del diametro di 800 e 600 mm.

L'installazione sperimentale comprende anche nove piezometri; i primi otto, disposti lungo due allineamenti, sono costituiti di tubi forati per il tratto interno al rilevato; il nono, provvisto di fori sull'intera altezza, è immerso nel serbatoio.

Per rilevare la posizione assunta dalla superficie libera dell'acqua nel serbatoio e nel rilevato al trascorrere del tempo, sono stati posti all'interno dei piezometri coppie di elettrodi a quote prefissate. Ciascun elettrodo è collegato con una batteria e con una lampadina spia.

L'esperienza è consistita nella esecuzione di una manovra di svasso del serbatoio dopo un lungo periodo di invaso che ha determinato la saturazione del rilevato.

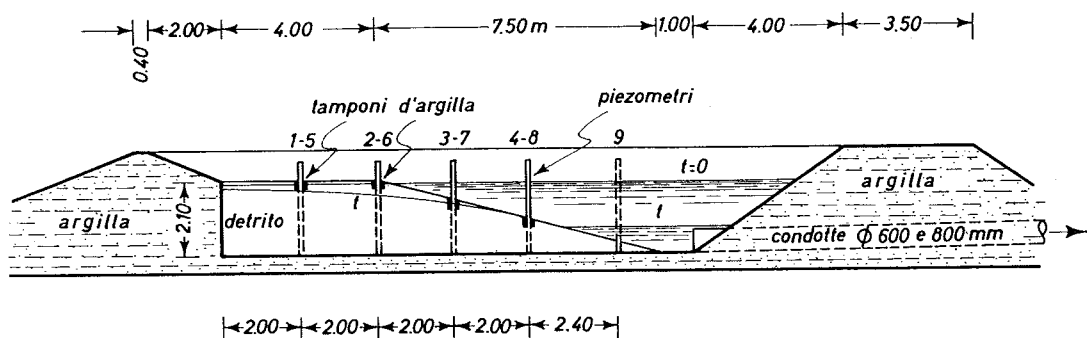


Fig. 4. — Sezione del rilevato sperimentale.

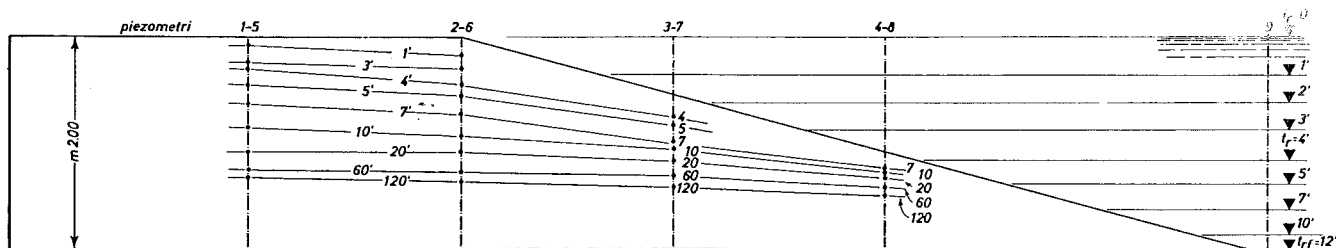


Fig. 5. — Risultati della manovra di svasso sul rilevato sperimentale.

I risultati dell'esperienza, condotta dopo ovvi controlli sulla ripetibilità delle prove e sul funzionamento della installazione sperimentale, sono riportati nella fig. 5, in cui si possono osservare le posizioni assunte dall'acqua nel serbatoio e dalla linea libera nel rilevato, in alcuni istanti  $t_{r,i}$ , compresi tra 1' e 120' misurati dall'inizio della manovra di svasso.

Si osserva che il materiale presenta discrete caratteristiche drenanti e che a svasso completo ( $t_{r,i} = 12'$ ), il livello dell'acqua in corrispondenza delle verticali 1-5, ha raggiunto un livello all'incirca pari alla metà di quello relativo alla condizione iniziale ( $t_{r,i} = 0$ ).

### 3. Il modello analogico

I modelli Hele-Shaw, ben noti in idraulica [RUSSO SRENA A., 1954], sono costituiti di due lastre affiancate; nell'intercapedine tra le lastre si fa scorrere un fluido viscoso che generalmente è olio.

La legge che regola il moto laminare del fluido tra le lastre parallele è analoga alla legge di Darcy che regge il moto di filtrazione nei mezzi porosi,

$$(1) \quad V = k_m i$$

dove  $k_m$  indica la permeabilità del modello che dipende dalla distanza  $d$  tra le lastre e dai valori del peso specifico  $\gamma$  e della viscosità  $\mu$  dell'olio;

se il numero di Reynolds  $R_e = \frac{\rho V d}{\mu}$  è inferiore a circa  $10^{-4}$  si ha:

$$(1') \quad k_m = \frac{1}{12} \frac{\gamma}{\mu} d^2$$

In queste condizioni la corrispondenza tra il fenomeno di filtrazione in sito e il moto dell'olio nel modello, è espressa dalla seguente relazione tra le scale dei tempi  $\lambda_t$ , delle lunghezze  $\lambda_l$ , della permeabilità  $\lambda_k$  e delle porosità effettive  $\lambda_e$  [THIRRIOT C., 1968]:

$$(2) \quad \frac{\lambda_t \lambda_k}{\lambda_e \lambda_l} = 1$$

Il modello costruito per interpretare le esperienze sul rilevato sperimentale è illustrato in dettaglio nella fig. 6.

Esso è costituito di due lastre di vetro, che riproducono alla scala  $\lambda_l = 1:10$  la sezione del rilevato; le lastre sono tenute alla distanza costante di mm 2 da una fascia distanziatrice di alluminio disposta lungo il contorno.

Le lastre di vetro sono contenute tra altre due lastre di perspex, alle quali è saldato un tubo anch'esso di perspex.

Nel tubo è inserito un termometro con divisioni al decimo di grado; alla base del tubo sono poste due saracinesche in serie del diametro di 2"; la prima (A), del tipo a volantino, serve per la regolazione della velocità di abbassamento dell'olio contenuto nel tubo, la seconda (B), del tipo a leva, è impiegata per dare inizio all'esperienza. Sulla lastra anteriore del modello è tracciato un reticolo che costituisce il sistema di riferimento.

Completa l'apparecchiatura un cronometro a quadrante ampio che si può bene osservare nella fotografia della fig. 7.

L'olio adoperato per le esperienze è del tipo TERESSO 52 prodotto dalla ESSO.

Assunta per il modello una porosità effettiva pari alla unità ( $e_m = 1$ ) la (2) diventa:

$$(3) \quad \lambda_t \lambda_k = 1$$

ovvero

$$(3') \quad t_{m,i} \cdot k_m = t_{r,i} \cdot k_r$$

dove  $t_{m,i}$  sono gli istanti misurati nell'esperienza sul modello Hele-Shaw, corrispondenti ai  $t_{r,i}$  già menzionati (v. fig. 5).

Per calcolare  $k_m$  si è adoperata un'espressione determinata sperimentalmente per l'olio TERESSO 52:

$$(4) \quad k_m = (3,09 T^\circ - 17) d^2 \text{ cm}^2/\text{sec}$$

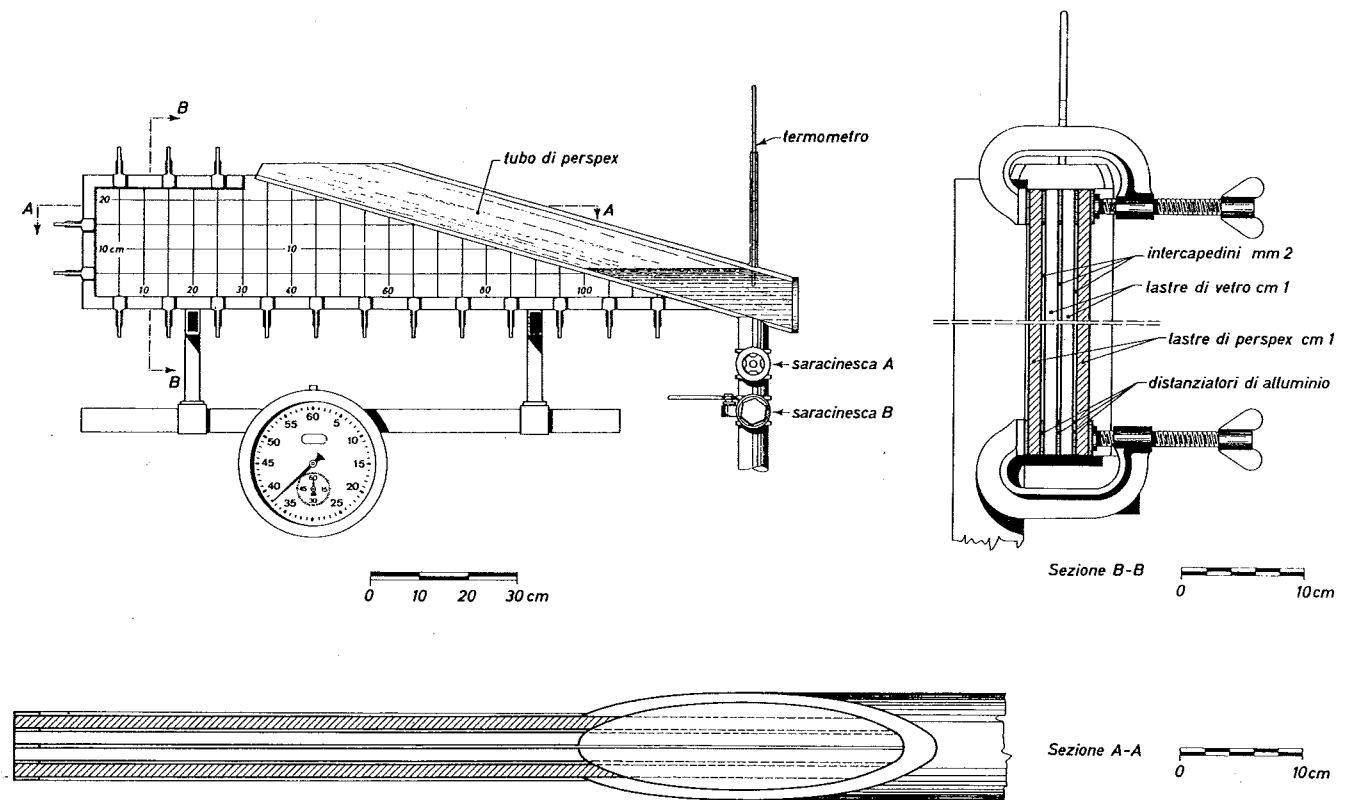


Fig. 6. — Particolari costruttivi del modello Hele-Shaw.

con  $d$  espressa in cm e  $T^\circ$ , che è la temperatura dell'olio, in gradi centigradi ( $^\circ$ ).

Per determinare il valore del coefficiente di permeabilità  $k_r$  del materiale del rilevato si è operato per tentativi, come segue.

Fissato un valore arbitrario per  $k_r$ , e calcolati con la (4)  $k_m$  e con la (3') i valori di  $t_{m1}$  si operava sulle saracinesche A e B del modello Hele-Shaw, in modo tale da rispettare per il livello

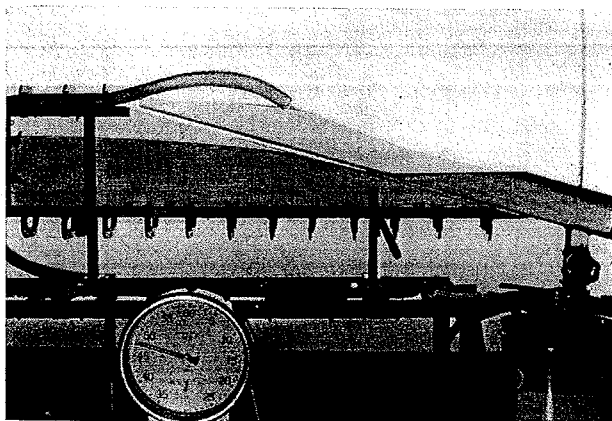


Fig. 7. — Il modello Hele-Shaw nel corso dell'esperienza.

(2) La (4) è stata stabilita dall'Ing. SANTORO M. mediante esperienze i cui risultati sono in corso di elaborazione.

nel tubo, le scale dei tempi e delle lunghezze, cioè la (2).

Il medesimo confronto si effettuava, con l'ausilio di fotografie, per le linee di saturazione in corrispondenza delle verticali dei piezometri.

I risultati sono raccolti nei grafici della fig. 8 nei quali si riportano, in ascisse, i tempi in minuti e, in ordinate, le quote in metri.

Su ciascuna delle curve relative alle esperienze su modello è indicato il valore del coefficiente di permeabilità  $k_r$  corrispondente.

Nella fig. 8 si riportano quattro grafici per ciascuna delle verticali strumentate della fig. 5.

Si osserva che la curva a tratteggio, che si riferisce alla esperienza in sito, ha andamento dello stesso tipo di quella relativa alle esperienze su modello; essa risulta compresa nel campo delimitato dalle curve

$$k_r = 0,20 \div 0,50 \text{ cm/sec.}$$

Considerate le modalità seguite nelle esperienze, ne segue che il materiale del rilevato, ai fini di un processo di filtrazione, può riguardarsi come un mezzo isotropo e omogeneo, dotato di un coefficiente di permeabilità « significativo »  $k_r$ , il cui valore è dell'ordine di qualche unità per  $10^{-1}$  cm/sec.

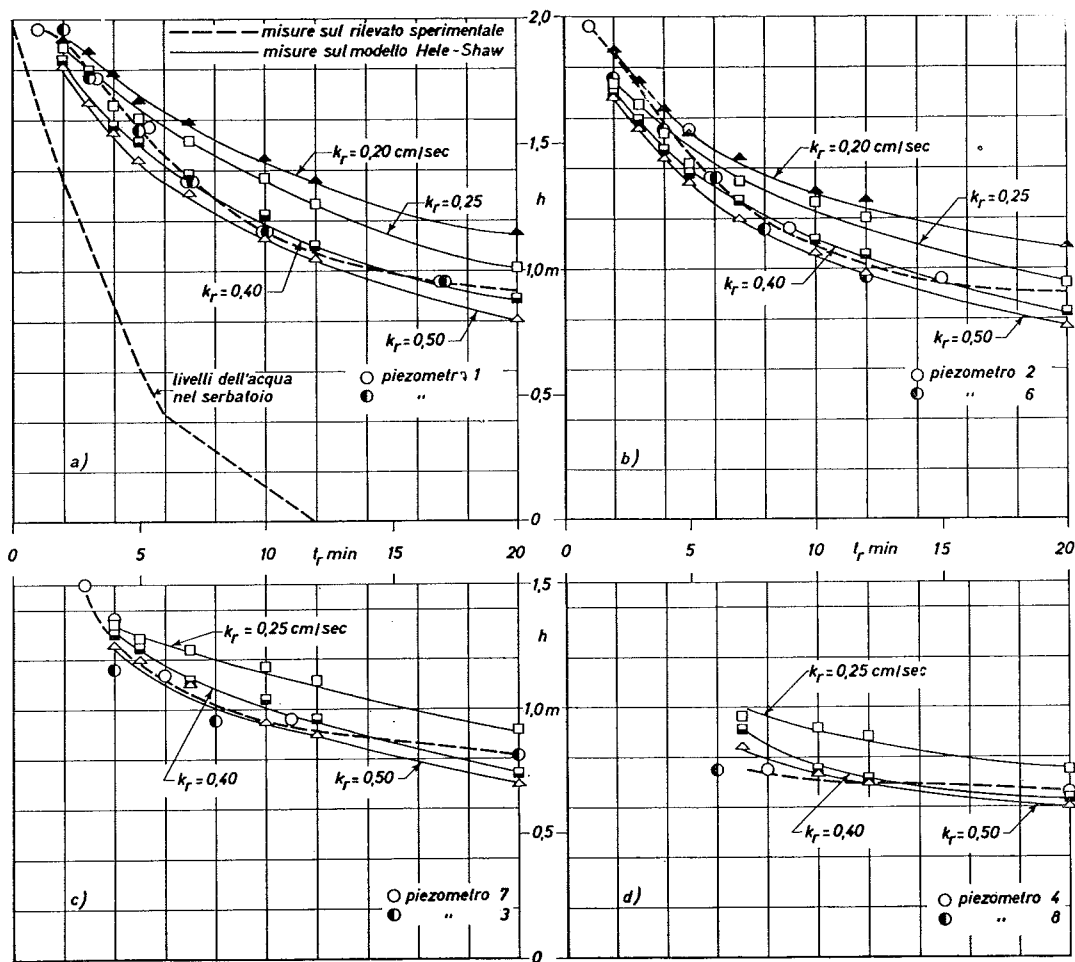


Fig. 8. — Confronto tra i risultati delle esperienze eseguite sul rilevato sperimentale e sul modello Hele-Shaw.

### Conclusioni

Il procedimento seguito ha permesso di verificare che, per il materiale in esame, attraverso le usuali esperienze di laboratorio su provini costipati, non è sempre possibile misurare valori del coefficiente di permeabilità significativi ai fini dello studio del processo di drenaggio del fianco a monte delle dighe di terra durante la manovra di svaso.

Questo valore è assai più elevato di quello che è stato misurato con le prove di laboratorio su provini costipati.

Ciò può attribuirsi alla non rappresentatività dei provini che sono, per necessità, di piccole dimensioni rispetto a quelle del rilevato, e alla direzione del moto dell'acqua, che nel provino risulta ortogonale ai piani di stratificazione e nel processo di filtrazione nel rilevato pressoché parallela a questi piani.

Il procedimento proposto, di cui è riportata una applicazione, permette di superare molte delle principali difficoltà cui si è fatto cenno e con-

sente di determinare il valore del coefficiente di permeabilità significativo ai fini del problema di svaso.

Si osserva che nel caso in esame il valore ottenuto con le esperienze di svaso in grande scala è circa dieci volte maggiore del valore più elevato misurato con le prove di laboratorio.

Per concludere si osserva che il rilevato sperimentale si è ritenuto rappresentativo del fianco a monte della diga, al quale è stato quindi attribuito il valore del coefficiente di permeabilità dedotto con le esperienze di svaso.

### BIBLIOGRAFIA

- CASAGRANDE A., SHANNON W. L. (1952) - *Base course drainage for airport pavements*. Trans. A.S.C.E.  
 CURTO G. (1969) - *Sul moto vario di riempimento e di vuotamento di un filtro omogeneo orizzontale. Schema di alimentazione artificiale per lo sfruttamento di una falda subalvea. Parte I: Il riempimento*. Atti Acc. Sc. Lett. Arti di Palermo, Serie IV, Vol. XXIX - Parte I, 1968-69.  
 CURTO G. (1972) - *Un metodo numerico alle differenze finite per la integrazione della equazione differenziale del moto*

*vario di filtrazione. Atti Acc. Sc. Lett. Arti di Palermo, Serie IV, Vol. XXXI, Parte I - 1970-71.*

DVINOFF A. H., HARR M. E. (1971) - *Phreatic surface location after a draw-down. Proc. A.S.C.E. SM1.*

NEWLIN C. W., ROSSIER S. C. (1967) - *Embankment drainage after instantaneous draw-down. Proc. A.S.C.E. SM6.*

RUSO SPENA A. (1954) - *Moti filtranti a superficie libera in presenza della capillarità. En. El. 12.*

THIRRIOT C. (1968) - *Ecoulement non permanent de filtration dans les barrages en terre. Atti XI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, di Genova.*

## SUMMARY

### **Permeability of the upstream shell of an earth dam during rapid drawdown**

The value of pore pressure acting in the upstream shell of an earth dam during the draw-down condition depends, for an incompressible medium, essentially upon the coefficient of permeability of material.

It is well known, however, that great difficulties may be encountered in practice for a correct choice of the value of this coefficient to be introduced in computations, on account of the fact that the data obtained operating on small samples prepared in laboratory cannot always be transferred directly to the real porous medium, which is neither homogeneous nor isotropous with respect to permeability.

To overcome this difficulty AA. propose a new trial and error method based on the comparison of two series of draw-down experiments. The first series is conducted

in situ on a small scale earth embankment reproducing the upstream shell of the dam; the second is performed in the laboratory reproducing the phenomenon of draw-down on an analogic Hele-Shaw type model.

The velocity of draw-down in the H.S. model is varied until an optimum correspondance between the free surface in the embankment and in the model is found. A coefficient of permeability, that can be considered significant in the study of the process of horizontal drainage of the material, is found with the formula expressing the correspondance between the phenomena occurring in the emankment and in the model.

Authors show the results of a research conducted on the material employed for the construction of a dam in Sicily.

The value of the coefficient of permeability obtained by means of the proposed method is considerably higher than that derived from usual laboratory experiences.