

Recensioni

Il drenaggio della fondazione nelle pavimentazioni di piste aeroportuali (Base Course Drainage for Airport Pavements)
- CASAGRANDE A. e SHANNON W. L. - Trans A.S.C.E.,
vol. 117, 1952, pag. 792 a 820.

1. Posizione del problema.

La fondazione (intendiamo quella parte della sovrastruttura sulla quale viene appoggiato il rivestimento e che a sua volta poggia su di un sottofondo artificiale o naturale) delle pavimentazioni stradali ed aeroportuali è generalmente costituita da rocce sciolte poste in opera con tecnica appropriata. A questo scopo, ed a seconda della disponibilità, vengono impiegati materiali lapidei in pezzatura discreta (dell'ordine dei decimetri), ghiaia e sabbia, naturalmente od artificialmente mescolati fra loro; spesso è anche presente una certa percentuale di limo.

Questi materiali, più o meno porosi e più o meno permeabili, in determinate circostanze possono imbibirsi completamente di acqua o raggiungere condizioni prossime alla saturazione. In situazioni del genere le loro caratteristiche meccaniche risultano in generale differenti da quelle originarie ed in conseguenza possono determinarsi lesioni e deterioramenti più o meno gravi del rivestimento.

Il problema diviene particolarmente importante, ad esempio, nel caso degli aeroporti percorsi da traffico pesante. Si dispone allora nella fondazione un sistema di canalizzazioni (dreni) che ha la funzione di allontanare nel più breve tempo possibile l'acqua che si raccoglie nei pori del materiale.

Gli AA. della nota, che qui esaminiamo, hanno elaborato un metodo di calcolo che consente di progettare il sistema di drenaggio facendo in modo che, tenuto conto delle caratteristiche dei materiali impiegati nella fondazione, l'acqua defluisca verso l'esterno in un tempo prestabilito.

Prima di entrare nel merito della trattazione gli AA. ricordano alcune delle cause che possono portare alla saturazione dei materiali di fondazione:

a) L'acqua superficiale può infiltrarsi attraverso le fessure ed i giunti del rivestimento od addirittura attraverso il tessuto stesso di un manto particolarmente permeabile e provocare in breve tempo la saturazione di un materiale di fondazione dotato di un coefficiente di permeabilità più alto di quello del terreno sottostante (sottofondo artificiale o naturale).

b) La diminuzione di temperatura all'inizio dell'inverno provoca in alcuni climi la formazione di cristalli di ghiaccio nei terreni del sottofondo (il che invece può essere evitato per i materiali della fondazione adottando, in fase di progetto, criteri appropriati).

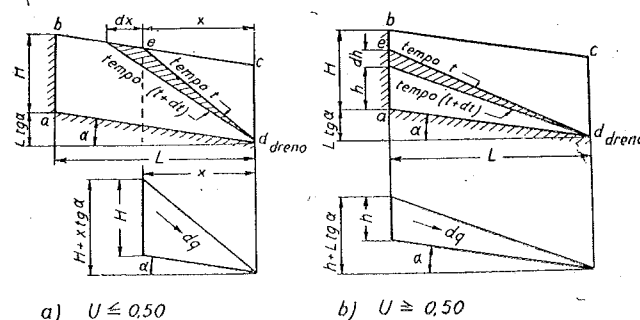


Fig. 1

In primavera, durante lo scioglimento del ghiaccio, l'acqua che ne risulta viene espulsa dal sottofondo a causa del peso proprio dell'opera e dei carichi applicati in superficie, e risale verso l'alto penetrando nella fondazione, costituita generalmente da materiali più permeabili. Ciò accade, ad esempio, in tutte le zone settentrionali degli Stati Uniti ed in quelle meridionali del Canada.

c) L'innalzamento periodico od occasionale della falda al disopra del profilo dei terreni di fondazione.

d) L'imbibizione per effetto della capillarità nei terreni a grana fina.

La superficie che delimita in alto la zona di materiale saturo varia nel tempo. Negli Stati Uniti, ad esempio, essa è stata rilevata a cura del Corps of Engineers in numerosi aeroporti in varie epoche dell'anno. Gli AA. riportano alcuni dati in proposito.

2. Soluzione teorica.

Consideriamo la fondazione di una pista aeroportuale.

La fig. 1 ne rappresenta la sezione retta ($a b$ rappresenta la traccia del piano verticale di simmetria della pista ed $a b c d$ il complesso della semi-fondazione). In d è collocato il dreno.

Il problema è ovviamente piano. Supponiamo che al tempo $t = 0$ la fondazione risulti completamente imbibita d'acqua.

Oltre alle caratteristiche geometriche della fondazione, indicate in fig. 1, i parametri che figurano nel problema sono:

k = coefficiente di permeabilità del materiale costituente la fondazione, in $\text{cm} \times \text{sec}^{-1}$;

n_e = porosità effettiva ⁽¹⁾, adimensionale.

Scopo della teoria è quello di valutare il tempo necessario perchè si verifichi il drenaggio dei materiali costituenti la fondazione. Gli AA. introducono le seguenti ipotesi:

a) Le linee ad e ab sono linee di flusso. La prima ipotesi corrisponde al caso di sottofondo assai meno permeabile della fondazione, e la seconda tiene conto della condizione di simmetria già ricordata.

b) Si trascura l'influenza delle forze di capillarità.

c) La linea di saturazione viene considerata come rettilinea e passante ad ogni istante per il condotto di drenaggio, che viene assimilato ad un punto (punto d nella fig. 1).

L'altro estremo della linea di saturazione è, al tempo

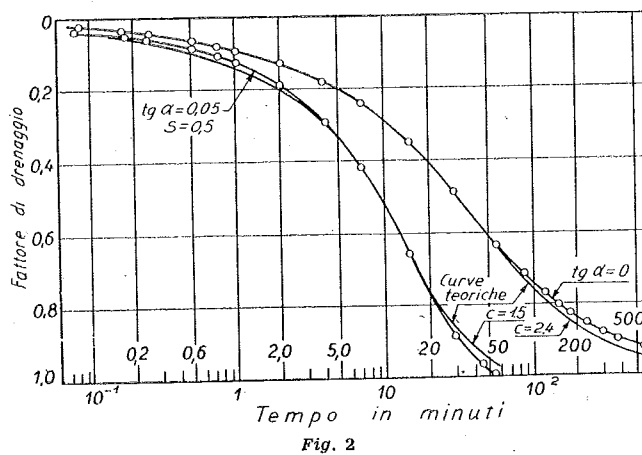


Fig. 2

$t = 0$, nel punto c e successivamente si sposta lungo la spezzata cba .

a) Nelle ipotesi precedentemente ammesse la cadente piezometrica è data da $\frac{H + x \tan \alpha}{x}$ nella figura 1a, che rappresenta lo schema di calcolo per l'analisi

della prima parte del fenomeno, ed è data da $\frac{h + L \tan \alpha}{L}$ (fig. 1b) quando la linea di saturazione supera la posizione bd . Viene introdotto però un coefficiente correttivo c_1 sul quale ritorneremo; si considerano per-

(1) La porosità effettiva viene definita tenendo conto del fatto che parte dell'acqua, trattenuta dalle forze di capillarità, rimane inclusa negli spazi fra i singoli granelli e non partecipa al fenomeno di drenaggio. Essa è eguale quindi al rapporto tra il volume dei vuoti che è possibile effettivamente drenare ed il volume totale del terreno.

ciò come cadente, rispettivamente nei due casi,

$$\frac{H + x \tan \alpha}{c_1 x} \quad \text{e} \quad \frac{h + L \tan \alpha}{c_1 L}$$

Il coefficiente c_1 viene supposto costante durante tutto il processo.

e) Nello sviluppo dei calcoli si tiene conto di una sezione media, attraverso cui defluisce l'acqua, eguale a

$$\frac{H}{2 c_2} \quad \text{e} \quad \frac{h}{2 c_2}$$

rispettivamente nella fig. 1a e nella fig. 1b. Anche c_2 viene considerato costante.

All'istante t la parte della sezione $abcd$ già drenata è rappresentata da cde . Gli AA. hanno preferito ridursi a variabili adimensionali introducendo, in luogo dell'area drenata cde , il fattore di drenaggio:

$$U = \frac{\text{Area}(cde)}{\text{Area}(abcd)}$$

ed in luogo del tempo t il fattore:

$$T = \frac{2tkH}{c n_e L^2}$$

in cui $c = c_1 c_2$.

Le caratteristiche geometriche della sezione intervengono poi con il parametro adimensionale:

$$S = \frac{H}{L \tan \alpha}$$

La teoria in esame conduce alle seguenti formule risolutive:

per $U < 0,50$ (schema della fig. 1a)

$$T = 2US - S^2 \cdot \ln \frac{S+2U}{S}$$

per $0,50 \leq U \leq 1$ (schema della fig. 1b)

$$T = S + S \cdot \ln \frac{2S - 2US + 1}{(2 - 2U)(S + 1)} - S^2 \ln \frac{S + 1}{S}$$

La relazione $U(T)$ è riportata graficamente nella fig. 2 per tre valori particolari di S .

E' interessante notare l'analogia che esiste fra queste curve e quelle ben note dei cedimenti in funzione del tempo nella teoria della consolidazione di TERZAGHI.

3. Prove su modello in laboratorio.

Allo scopo di verificare i risultati della teoria sono state eseguite in laboratorio alcune prove su modello. Il tipo di modello costituito essenzialmente da due lastre parallele poste a piccola distanza e tra le quali si mette in movimento un liquido viscoso, è ben noto, ed è già

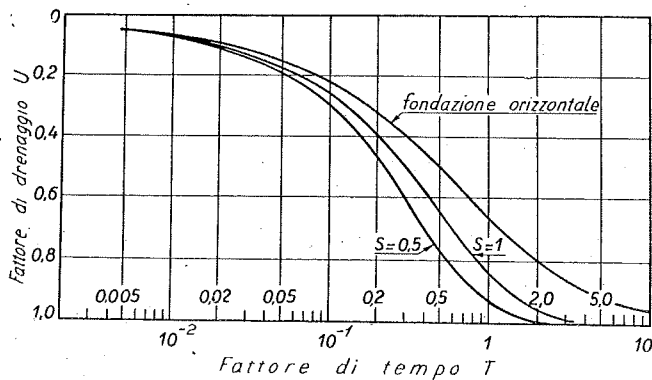


Fig. 3

stato frequentemente adoperato nel passato per lo studio dei moti di filtrazione permanenti.

L'applicazione di questo stesso principio allo studio dei moti non permanenti è stata possibile dopo il superamento di alcune difficoltà tecniche sulle quali sorvoliamo.

Il liquido adoperato nelle esperienze è la glicerina.

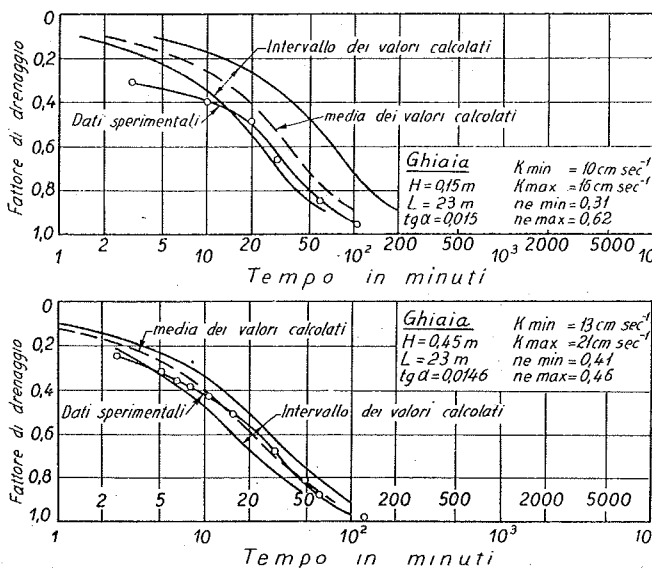


Fig. 4

Le condizioni al contorno sono quelle supposte nel paragrafo precedente (fig. 1).

In corrispondenza del lato *cd* veniva disposto un fermo temporaneo in modo da consentire il riempimento del sistema con glicerina. Al tempo $t=0$ il fermo veniva tolto e la glicerina lasciata fluire verso l'esterno. Il rilievo della superficie libera veniva ese-

guito fotograficamente ad intervalli di tempo. Una bilancia sistemata in vicinanza della zona di sbocco permetteva di leggere il peso del liquido defluito tra i tempi 0 e t .

In tal modo si rilevava sperimentalmente la variazione del fattore di drenaggio U in funzione del tempo t .

Mediante prove preliminari era stato poi riscontrato che, nel moto attraverso le due lastre, la velocità della glicerina era proporzionale alla prima potenza della cadente piezometrica. Il rapporto fra questi due parametri veniva considerato come permeabilità.

Durante le prove veniva misurata la temperatura della glicerina onde tener conto delle cause generanti variazioni della viscosità e quindi della permeabilità del sistema.

4. Prove su modelli in grande scala.

Per completare l'indagine sono stati costruiti alcuni modelli in grande scala e come liquido è stata adoperata l'acqua.

La permeabilità k e la porosità n_e dei materiali adoperati (ghiaia e sabbia o ghiaia pulita) venivano determinate direttamente in sito dopo la posa in opera.

All'inizio il materiale veniva artificialmente saturato mediante acqua deaerata. Durante il processo di drenaggio veniva rilevata la posizione della superficie libera e veniva misurata la portata scaricata nei dreni. In definitiva anche qui veniva sperimentalmente rilevata la relazione $U(t)$.

5. Paragone fra i vari risultati.

Dalle esperienze risultava la relazione $U(t)$ nel caso dei modelli di laboratorio e nel caso dei modelli in grande scala. Inoltre erano a disposizione tutte le misure su aeroporti già costruiti dal Corps of Engineers. In ciascuno dei casi gli AA. hanno posto a raffronto i risultati del calcolo con quelli sperimentali.

a) Modelli in piccola scala (vedi fig. 3).

Come si è visto nel paragrafo 2 nelle formule compare un coefficiente correttivo c che la teoria non pone in relazione ad alcuna caratteristica del sistema drenante. In altri termini il valore di c resta arbitrario.

Per conseguenza è possibile dare a c il valore, in corrispondenza del quale si verifica la migliore concordanza della teoria con i risultati sperimentali.

Ad esempio, nei due casi a cui si riferisce la fig. 3, ciò si verifica per $c=1,5$ e per $c=2,4$.

Queste prove dimostrano in conclusione che la funzione $U(t)$, dedotta teoricamente, rappresenta bene l'andamento del fenomeno, benchè rimanga arbitrario il valore di un coefficiente di correzione.

Secondo gli AA. risulta dal complesso di queste esperienze che il termine correttivo c varia entro i limiti seguenti:

per $\alpha=0$,

$$\frac{L}{H} < 5 \quad c > 2,7$$

$$5 < \frac{L}{H} < 40 \quad c = \text{cost.} \approx 2,7$$

per $\alpha \neq 0$.

$$c = 2,4 - \frac{0,8}{\sqrt[3]{S}}$$

b) Modelli in grande scala (vedi fig. 4).

Nella fig. 4 sono riportati i risultati di alcune prove accanto alle curve teoriche. Si noti che, invece di una sola curva $U(t)$, si è stabilito un campo di curve dedotte in base alla teoria assegnando alla porosità n_e

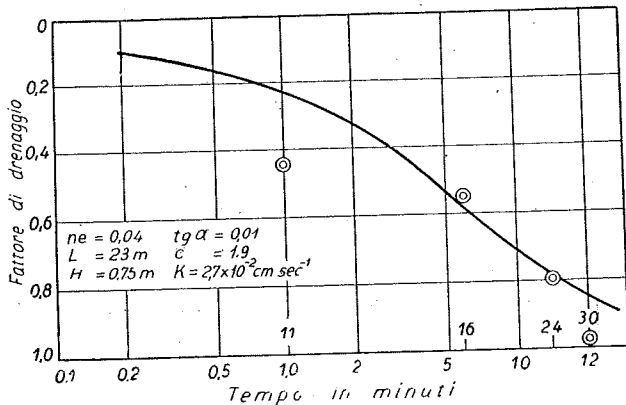


Fig. 5

ed alla permeabilità k i valori massimi ed i valori minimi fra quelli misurati nel modello. Quanto al coefficiente correttivo c , gli AA. non ne danno il valore; è da presumere che a c siano stati attribuiti i valori stabiliti in a).

Il materiale di cui alla fig. 4 è ghiaia pulita. L'accordo tra i risultati del calcolo e quelli sperimentali può considerarsi soddisfacente entro i limiti degli errori di misura.

I risultati relativi alle ghiaie con un certo contenuto di sabbia, per i quali rimandiamo al testo originale, mostrano invece una certa discordanza. Per valori di U elevati i tempi di drenaggio effettivi risultano maggiori di quelli teorici, mentre il contrario sembra avvenire per bassi valori di U .

Questa discordanza può essere dovuta ad una serie di fenomeni secondari di cui non si è potuto tener conto, come le variazioni di k e n_e nel corso della prova e l'effetto delle forze di capillarità.

c) Opere realizzate.

Un terzo paragone, il più importante in pratica, si è potuto istituire fra la teoria ed i risultati delle misure eseguite sugli aeroporti già costruiti.

Nella fig. 5 sono riportati alcuni punti, che rappresentano le misure eseguite in un aeroporto del Maine

(S. U.). E' poi riportata la curva dedotta per via teorica.

Per lo meno per valori elevati della percentuale di drenaggio, l'accordo può considerarsi soddisfacente, data anche la nota difficoltà delle misure di permeabilità in sito, sulle quali sono stati basati i calcoli.

6. Raccomandazioni per il progetto dei dreni.

I fattori principali che intervengono nel progetto dei dreni sono stati già menzionati nel paragrafo 2.

Questi fattori possono essere variati per raggiungere la soluzione più conveniente. Ad esempio può risultare più economico adoperare in fondazione un materiale con cattive proprietà drenanti disponendo i dreni a piccola distanza, anziché un materiale con coefficiente di permeabilità più elevato, combinato con dreni disposti a distanze maggiori.

Dall'esperienza risulta che in condizioni medie il valore del coefficiente c può essere assunto eguale a circa 2. Quanto al tempo di drenaggio gli AA. suggeriscono di impostare i calcoli supponendo che il tempo necessario per raggiungere $U = 0,5$ non sia superiore ai 10 giorni.

Gli AA. hanno infine sviluppato l'applicazione del calcolo ad un esempio concreto.

CONCLUSIONE

Le soluzioni rigorose dei problemi di filtrazione a superficie libera in condizioni di moto non permanente sono assai poco frequenti nella letteratura tecnica. A causa delle notevoli difficoltà matematiche, tali problemi devono spesso venir risolti mediante l'uso di metodi approssimati facenti capo ad ipotesi semplificative da stabilirsi caso per caso. Il pregio della nota che abbiamo esaminato è costituito dal fatto che la trattazione teorica, basata sulle ipotesi illustrate, è stata integrata da numerose prove sperimentali su modello e, quel che è soprattutto importante, dalle misure eseguite sui manufatti in esercizio.

La teoria, come accade, ha dovuto notevolmente schematizzare il fenomeno. Ad esempio si è dovuta trascurare la influenza delle condizioni reali allo sbocco che, come si è visto, è stato assimilato ad un punto. L'esperienza, d'altra parte, ha permesso di controllare l'andamento generale del processo pur lasciando sostanzialmente arbitrario il valore di un coefficiente correttivo. In conclusione la teoria può ritenersi verificata in via di prima approssimazione limitandoci però al caso dei materiali a grana grossa. Nel caso che nella fondazione vi siano inclusioni di materiali più fini i fenomeni secondari cui si è accennato nel par. 5b, e che probabilmente alterano alquanto il processo di drenaggio, specie nella sua fase di esaurimento, dovrebbero formare oggetto di indagini più approfondite.

(R. Jappelli)