

QUINTO CONVEGNO DI GEOTECNICA
Palermo, Marzo 1961

CEDIMENTI E TEMPI DI CONSOLIDAZIONE
DI TERRENI DI FONDAZIONE

F. QUARANTA (*)

SOMMARIO - In questa nota si riferisce sulla corrispondenza tra calcoli e risultati pratici in merito alla consolidazione del terreno di fondazione di un tronco di rilevato relativo a una pista aeroportuale.

Il calcolo del cedimento, in relazione al tempo di consolidazione, è stato effettuato in base ai risultati delle prove di compressibilità su campioni prelevati nel terreno di fondazione.

La suddetta corrispondenza tra calcoli e realtà è parsa meritevole di essere segnalata.

Inoltre, poiché il citato rilevato sarà in seguito prolungato sullo stesso terreno di fondazione, sono stati ripetuti i calcoli dei tempi di consolidazione prevedendo l'impiego di drenaggi verticali in sabbia, quale provvedimento costruttivo atto ad accelerare il processo di consolidazione del terreno di fondazione, contenendolo, per quanto possibile, entro i tempi di costruzione del rilevato stesso e della sovrastruttura.

1 - Premessa

Una delle determinazioni più interessanti riguardanti la stabilità delle opere in terra o delle fondazioni di fabbricati, poggianti su terreni compressibili, è la valutazione preventiva del cedimento che il terreno di fondazione subirà, per effetto dell'applicazione dei carichi, e del tempo necessario perché tale cedimento si verifichi, secondo determinati gradi di consolidazione.

La predetta determinazione acquista particolare importanza in fase di progettazione delle opere, onde adottare i necessari provvedimenti costruttivi, o semplici accorgimenti relativi alla successione delle fasi di lavorazione; ma lo stesso calcolo non perde interesse se eseguito a distanza di tempo dopo la costruzione, giacché può fornire un controllo sulla maggiore o minore corrispondenza tra i risultati teorici e quelli della realtà.

E' quanto si vuole mostrare brevemente in questa nota, in cui il citato calcolo si riferisce alla consolidazione di un terreno di fondazione di un tronco di rilevato costruito alcuni anni fa, per una pista di un aeroporto italiano; poiché in seguito detta pista sarà prolungata su terreno della stessa natura, la determinazione teorica del cedimento del terreno di fondazione e dei tempi corrispondenti ai vari gradi di consolidazione può riuscire utile ai due scopi: di controllare la corrispondenza tra calcoli e realtà, per la parte di rilevato eseguita, e di prevedere gli opportuni provvedimenti costruttivi, per la parte da realizzare.

2 - Calcolo del cedimento e dei tempi di consolidazione del terreno di fondazione del rilevato

Si tratta, come accennato, del tronco terminale di un rilevato, alto 2 metri, largo circa 100 metri e che per circa 150 metri della sua lunghezza (1/20 della lunghezza totale), poggia su un terreno alluvionale, limoso-argilloso, ad alto contenuto di acqua.

La rimanente parte del rilevato poggia invece su un terreno sabbioso.

Il terreno di fondazione, nel tratto in esame, è costituito precisamente da uno strato di altezza m 4, di limo argilloso (interessato da una falda freatica quasi affiorante), poggiante su uno strato profondo di terreno argilloso compatto e relativamente meno umido.

Le caratteristiche principali del terreno formante lo strato di 4 metri sono le seguenti:

— granulometria:	passante al n. 200 : pass. al n. 40 = 75%
— C.B.R. saturo:	5%
— indice di plasticità:	25%
— densità secca:	1,9 gr/cm ³

Le caratteristiche del materiale granulare costituente il rilevato sono le seguenti:

— granulometria:	continua, dimensione massima 30 mm; passante al numero 200: 4%
— C.B.R. saturo:	75%
— plasticità:	N.P.
— densità secca:	2,06 gr/cm ³

(*) Dr. Ing. Federico QUARANTA, Capitano del Genio Aeronautico, Assistente volontario di *Costruzione di Strade, Ferrovie e Aeroporti*, presso l'Università di Roma.

Il rilevato nel tronco in esame ha, come già detto, un'altezza in asse di m. 2; su di esso è posta una sovrastruttura stradale di altezza complessiva (tra fondazione e pavimentazione) cm. 50.

Dopo quattro anni dalla sua costruzione, l'insieme del rilevato e della sovrastruttura ha subito cedimenti, non uniformi, che nei punti di massimo avvallamento raggiungono i 9 cm.

Il calcolo del cedimento e dei tempi di consolidazione è stato effettuato prendendo in esame lo strato superiore di terreno, di 4 metri di altezza, direttamente interessato dal rilevato, mentre si è tralasciata la consolidazione dello strato sottostante che, per la larghezza del rilevato, è ugualmente interessato fino a profondità notevoli, ma con tempi di consolidazione (dipendenti da questa dimensione) eccessivamente elevati.

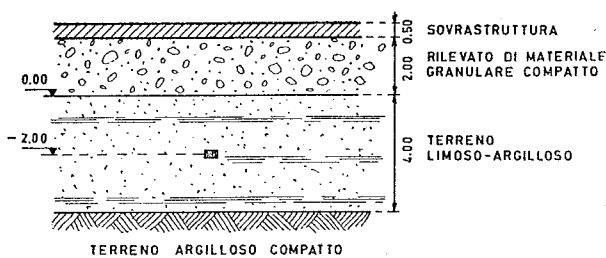


Fig. 1

Per la determinazione, sono stati prelevati campioni « indisturbati » di terreno a quota -2,00 dal piano di campagna originario, campioni rappresentativi dello strato di 4 m su menzionato (fig. 1).

Detti campioni sono stati sottoposti a prove di compressibilità (ad espansione laterale impedita), ricavando per ciascun campione la curva *pressione-indice dei vuoti* e le curve *cedimenti-tempo* per vari

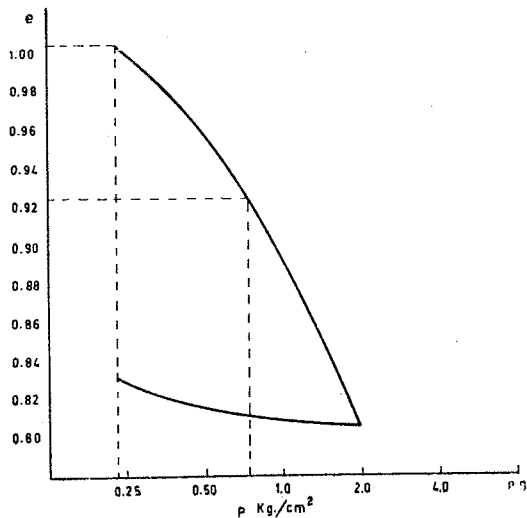


Fig. 2

incrementi di carico, in particolare quello corrispondente alla realtà (da prima a dopo la costruzione del rilevato).

Nelle figure 2 e 3 sono riportate rispettivamente

dette curve per il campione che ha rivelato il maggior coefficiente di compressibilità $\alpha_v = -\Delta e / \Delta p$ e che pertanto è stato preso in considerazione per il successivo calcolo.

Per la determinazione del cedimento dello strato, a completa consolidazione, sono state valutate le pressioni applicate alla profondità considerata di m -2,00 dal piano di campagna, nelle condizioni preesistenti e susseguenti alla costruzione del rilevato.

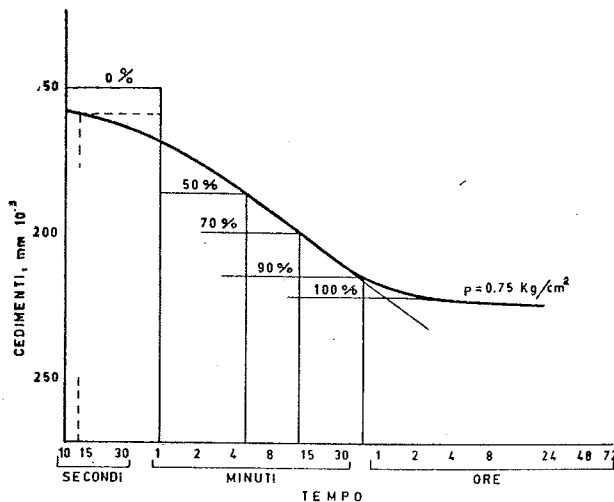


Fig. 3

Pressione preesistente:

$$p_0 = 0,6 \gamma_1 h_1$$

essendo $\gamma_1 = 0,0019 \text{ kg/cm}^3$ la densità secca del materiale e $0,6 \gamma_1$ il peso di volume della terra supposta immersa in acqua; $h_1 = 200 \text{ cm}$ la profondità del campione considerato.

Pertanto:

$$p_0 = 0,0019 \cdot 0,6 \cdot 200 = 0,23 \text{ kg/cm}^2$$

Pressione dopo la costruzione del rilevato:

$$p_1 = p_0 + \gamma_2 h_2 + \gamma_3 h_3$$

essendo

p_0 la pressione preesistente;

$\gamma_2 = 0,002 \text{ kg/cm}^3$ il peso di volume della terra costituente il rilevato compattato;

$\gamma_3 = 0,0025 \text{ kg/cm}^3$ il peso di volume del materiale costituente la sovrastruttura;

$h_2 = 200 \text{ cm}$ l'altezza del rilevato e

$h_3 = 50 \text{ cm}$ lo spessore della sovrastruttura.

Pertanto:

$$p_1 = 0,23 + 0,4 + 0,12 = 0,75 \text{ kg/cm}^2$$

Dalla curva edometrica riportata in figura 2 si ricavano i valori degli indici dei vuoti nel provino

corrispondenti alle suddette pressioni, cioè allo stato del terreno prima e dopo la costruzione del rilevato:

$$e_0 = 1,005$$

$$e_1 = 0,925$$

E poiché il cedimento S dello strato di terreno considerato, a consolidazione completa, è

$$S = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} H$$

si ricava

$$S = \frac{1,005 - 0,925}{2,005} \times 400 = 16 \text{ cm.}$$

Il calcolo dei tempi di consolidazione è stato effettuato per tre diversi gradi di consolidazione:

$$U = 50\%, \quad U = 70\%, \quad U = 90\%.$$

a) *Grado di consolidazione 50%*

Dalla curva edometrica *cedimenti-tempi* riportata in fig. 3 e corrispondente all'incremento di pressione da 0,23 a 0,75 kg/cm², si ricava il tempo necessario al verificarsi del 50% della consolidazione nel provino; il che permette di determinare il « coefficiente di consolidazione » c_v del terreno, espresso dalla relazione:

$$c_v = h^2 \frac{T_v}{t_{50}} \text{ cm}^2/\text{sec}$$

essendo

h = massimo percorso dell'acqua nel provino, in cm (per effetto del doppio drenaggio realizzato dalle due piastre porose di contenimento del provino, tale massimo percorso coincide con la semialtezza del provino stesso);

T_v = fattore di tempo, relativo a $U = 50\%$ e alle condizioni di drenaggio corrispondenti a quelle della prova edometrica; tale valore, espresso da un numero puro, è ricavabile dalla relativa curva di Barron (1): $T_v = 0,197$;

t_{50} = tempo, in secondi, corrispondente al 50% della consolidazione nel provino, ricavabile dalla curva in figura 3, pari a 5 min = 300 sec.

Pertanto:

$$c_v = 1 \frac{0,197}{300} = 6,57 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec.}$$

Conseguentemente il tempo di consolidazione (al 50%) dello strato rappresentato dal campione esaminato, è dato da:

$$t = \frac{1}{c_v} H^2 T_v$$

in cui

H = massimo percorso dell'acqua nello strato (coincidente, per le condizioni della realtà, con l'altezza dello strato) $H = 400$ cm

T_v = fattore di tempo, pari, per le condizioni della realtà, a 0,25 (cfr. curva di Barron; v. nota (1)).

Pertanto:

$$t = \frac{10^4}{6,57} \cdot 400 \cdot 0,25 = 6,12 \cdot 10^7 \text{ sec} =$$

$$= 1,94 \text{ anni} \cong 2 \text{ anni.}$$

b) *Grado di consolidazione 70%*

Ripetendo i calcoli analogamente al caso precedente, con diverso valore dei parametri, si ha:

$$c_v = h^2 \frac{T_v}{t_{70}}$$

con

$$T_v = 0,40$$

$$t_{70} = 13 \text{ min} = 780 \text{ sec}$$

ossia

$$c_v = 1 \cdot \frac{0,40}{780} = 5,12 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec.}$$

Conseguentemente il tempo di consolidazione (al 70%) dello strato di terreno è

$$t = \frac{10^4}{5,12} \times 400^2 \times 0,45 = 14 \times 10^7 \text{ sec} \cong 4,5 \text{ anni.}$$

c) *Grado di consolidazione 90%*

Analogamente, con diverso valore dei parametri (cfr. sempre le curve di Barron sopra citate e la curva in fig. 3), essendo

$$T_v = 0,85$$

$$t_{90} = 45 \text{ min} = 2700 \text{ sec,}$$

si ha

$$c_v = 1 \cdot \frac{0,85}{2700} = 3,15 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec.}$$

Conseguentemente il tempo di consolidazione (al 90%) dello strato di terreno è

$$t = \frac{10^4}{3,15} \times 400^2 \times 0,9 = 4,56 \times 10^8 \text{ sec} \cong 14,5 \text{ anni}$$

(1) Cfr. TSCHEBOTARIOFF, "Soil Mechanics, Foundations and Earth Structures" - Fig. 6, 11, pag. 113.

In definitiva il decorso dei cedimenti del terreno di fondazione in funzione del tempo, come deriva dal calcolo su riportato, è quello indicato graficamente dalla curva a) della fig. 4, avendo riportato in ordinate i cedimenti corrispondenti alle varie percentuali di consolidazione.

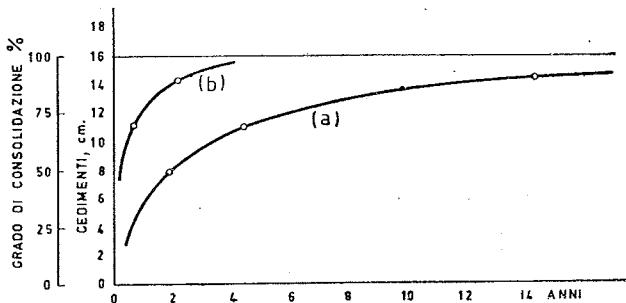


Fig. 4 - Decorso dei cedimenti nel tempo; curva a) senza drenaggi; curva b) con drenaggi verticali in sabbia.

Il cedimento dopo 4 anni dalla costruzione del rilevato risulta quindi, dal diagramma calcolato, di circa 10,5 cm, valore molto prossimo a quello rilevato nella realtà (9 cm), nei punti di massimo avvallamento.

Prendendo in considerazione i risultati delle prove edometriche effettuate su gli altri campioni prelevati si ottengono valori dei cedimenti leggermente inferiori ai precedenti.

3 - Calcolo dei tempi di consolidazione del terreno di fondazione del rilevato in presenza di drenaggi verticali in sabbia

Come detto nella premessa, risulta che il rilevato in questione dovrà essere prolungato in un prossimo futuro, per esigenze di prolungamento dell'intera pista a cui si riferisce.

E' interessante, pertanto, ripetere il calcolo dei tempi di consolidazione, prevedendo la costruzione, al di sotto del rilevato, nello strato di terreno di altezza m 4, di drenaggi verticali in sabbia (collegati superiormente da uno strato-filtro di sabbia, da cui l'acqua sia poi raccolta e allontanata), aventi la funzione di accelerare la consolidazione del terreno di fondazione, concentrandola, per quanto possibile, entro il tempo di costruzione del rilevato stesso e della sovrastruttura.

Nel caso di drenaggi cilindrici di diametro $d_w = 30$ cm e altezza m 4 con interasse $s = 4$ m, disposti « a quinconce » (ossia sui vertici di triangoli equilaterali di lato s) (fig. 5) interessanti tutto lo strato di terreno di fondazione in esame, il calcolo si ripete nel modo seguente:

a) Grado di consolidazione 50%

$$t = \frac{1}{c_v} H^2 T_v$$

in cui

$c_v = 6,57 \times 10^{-4}$ cm²/sec. coefficiente di consolidazione del terreno, per $U = 50\%$, già calcolato precedentemente;

H = massimo percorso dell'acqua nello strato, che per la presenza dei drenaggi verticali è pari al raggio del cilindro di influenza di ciascun drenaggio, dedotto il raggio del cilindro di sabbia, e cioè

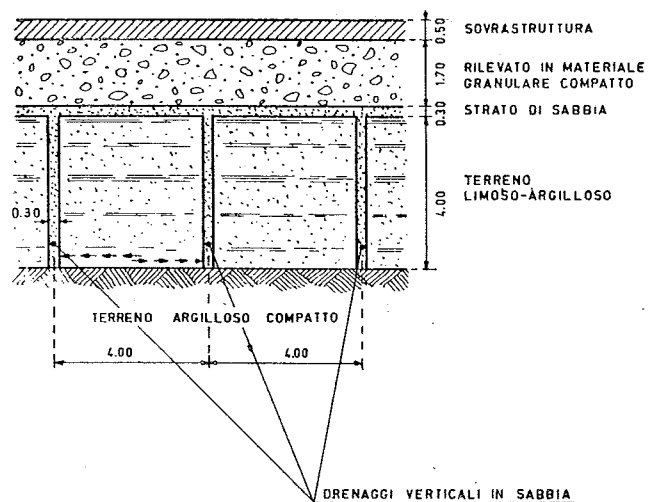
$$H = r_e - r_w$$

essendo

$$r_e = \frac{d_e}{2} = \frac{1,05 s}{2} = 210 \text{ cm}$$

$$r_w = \frac{d_w}{2} = 15 \text{ cm}$$

SEZIONE



PIANTA

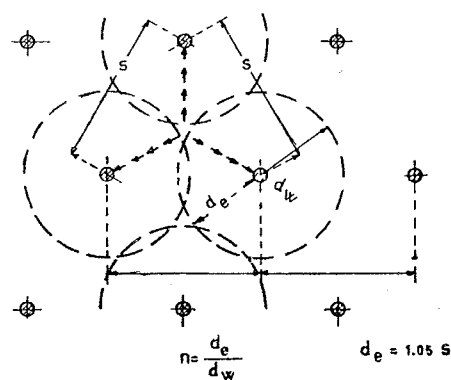


Fig. 5

$H = 195$ cm

T_v = fattore tempo, relativo a $U = 50\%$ e alle condizioni di drenaggio corrispondenti alla presenza dei cilindri verticali di sabbia, e dipendente dalle dimensioni e dall'interasse dei dre-

naggi stessi; per $n = d_e/d_v = 420/30 = 14$, la curva di Barron ⁽²⁾ fornisce $T_v = 0,15$.

Pertanto:

$$t = \frac{10^4}{6,57} \times 195^2 \times 0,15 = 0,87 \times 10^7 \text{ sec.} = \\ = 0,275 \text{ anni} = 100 \text{ giorni}$$

b) *Grado di consolidazione 70%*

Ripetendo i calcoli analogamente al caso precedente, con diverso valore dei parametri, si ha:

$$t = \frac{10^4}{5,12} \times 195^2 \times 0,30 = 2,22 \times 10^7 \text{ sec.} = \\ = 0,7 \text{ anni} \cong 8,5 \text{ mesi}$$

c) *Grado di consolidazione 90%*

Analogamente

$$t = \frac{10^4}{3,15} \times 195^2 \times 0,6 = 7,25 \times 10^7 \cong 2,3 \text{ anni}$$

Questi valori dei tempi sono riportati nella curva b) della fig. 4 in cui in ordinate sono riportati i corrispondenti valori del cedimento del terreno, ricavati in base ai vari gradi di consolidazione (percentuali della consolidazione totale, calcolata nel paragrafo precedente e pari a 16 cm).

Come si rileva, la consolidazione del terreno di fondazione, per la presenza dei drenaggi verticali,

viene grandemente accelerata, arrivando dopo 1 anno, periodo che può corrispondere alla durata delle lavorazioni, già al 75%; disponendo inoltre, i drenaggi verticali a distanza mutua inferiore a m 4, si può ottenere anche una consolidazione totale (o praticamente totale, cioè al 90%) durante il periodo di costruzione del rilevato e della sovrastruttura.

4 - Conclusione

Si è voluto mostrare, in questa breve nota, un esempio di corrispondenza abbastanza aderente tra previsioni di calcolo e risultati pratici, in merito al cedimento e ai tempi di consolidazione di un terreno di fondazione di un rilevato di pista aeroportuale.

Si tratta di uno di quei controlli sperimentali di cui si arricchisce la Geotecnica per avvalorare in campo pratico l'applicazione di metodi di calcolo che discendono da considerazioni teoriche.

In base alla riscontrata corrispondenza tra teoria e realtà, è stata ripetuta la determinazione dei tempi di consolidazione dello stesso terreno, prevedendo l'impiego di drenaggi verticali in sabbia, quali acceleranti della consolidazione, specie in considerazione del fatto che detto rilevato dovrà essere prolungato.

Si è trovato che lo stesso grado di consolidazione, di circa il 70%, che in assenza di drenaggi si è verificato dopo 4 anni, si verificherebbe, impiegando drenaggi verticali in sabbia, in soli 6 mesi, mentre praticamente l'intera consolidazione si realizzerebbe in circa 2 anni, cioè in un tempo ragionevole, corrispondente al tempo di costruzione dell'intero rilevato e della sovrastruttura cui si riferiva l'esempio citato.

Per cui, procedendo uniformemente nella costruzione dopo la realizzazione dei drenaggi suddetti, si può pensare che al termine dell'opera si sia raggiunta praticamente la consolidazione del terreno di fondazione, senza che si siano manifestati cedimenti differenziali nella struttura.

(2) Cfr. figura citata nella nota (1).

SUMMARY - In this note we refer to the correspondance between calculations and practical results for what concerns the settlement of the subsoil of a piece of embankment regarding an airport runway.

The calculation of the settlement with regard to the consolidation time has been done basing on the results of compressibility tests on subsoil samples.

We think that this correspondance between calculations and reality is worth to be mentioned.

In addition, since this embankment will be afterwards extended on the same subsoil, the calculations have been repeated, considering the use of vertical sand drains as a measure to accelerate the process of subsoil settlement and to keep it, as far as possible, within the time required by the construction of the embankment and of the runway pavement.

SOMMAIRE - Ici on se réfère à la corespondance entre les calculs et les résultats pratiques par rapport à la consolidation du terrain de fondation d'un tronçon de relevé d'une piste d'airport.

Le calcul d'affraissement, en relation au temps de consolidation, a été effectué en se basant sur les résultats des preuves de compressibilité d'échantillons du terrain de fondation.

Cette corespondance entre le calcul et la réalité est digne de remarque.

En outre, puisque ce relevé sera ensuite prolongé sur le même terrain de fondation on a répété les calculs des temps de consolidation en prevoyant l'emploi de drainages verticaux en sable, comme mesure de construction propre à accélérer le procédé de consolidation du terrain de fondation, en cherchant d'ailleurs de contenir, autant que possible, dans les temps de construction du relevé et de la structure supérieure.