

## PATOLOGIA DELLE FONDAZIONI

C. CESTELLI GUIDI (\*)

**SOMMARIO** - L'Autore in una breve premessa ricorda i pericoli cui vanno soggette le strutture poggianti su terreni fortemente cedevoli, principalmente per la sensibilità di questi a mutamenti delle condizioni di sollecitazione e, se le fondazioni sono su pali, per il fenomeno dell'attrito negativo.

Con l'articolo l'Autore inizia la descrizione di casi tipici di dissesto ponendo in evidenza le cause che li hanno prodotti ed i rimedi proposti ed adottati.

Dei primi tre casi illustrati in questa nota due riguardano cedimenti prodotti dall'azione costipante di rilevati ed il terzo cedimenti differenziali dovuti a variabilità di potenza degli strati compressibili. Viene posta in evidenza la insufficienza di buoni risultati di prove di carico su pali a garantire la stabilità della fondazione.

Le teorie della Meccanica delle Terre sono il prezioso strumento di analisi a disposizione del progettista che debba affrontare lo studio di problemi di fondazione, tanto più se in terreni fortemente cedevoli.

Non sempre però la situazione statica del complesso costruzione-sottosuolo si lascia schematizzare in termini chiari, come nelle esemplificazioni che si rinvengono nei testi, né la teoria, da sola, pone sempre in evidenza la latente insidia di un sottosuolo difficile cosicché una corretta impostazione teorica richiede anzitutto una oculata previsione qualitativa dei fenomeni basata sulla esperienza di casi simili, la cui conoscenza è tanto più utile se trattati di insuccessi tecnici.

Per tale ragione riteniamo di un certo interesse iniziare con questo articolo la descrizione <sup>(1)</sup> di « casi tipici » indicando le cause di dissesto ed i rimedi adottati.

La casistica mostra che i dissesti dei fabbricati sono quasi sempre dovuti a cedimenti differenziali delle fondazioni; il fatto che frequentemente questi non siano immediati, ma si rivelino solo alcuni anni dopo l'ultimazione dei lavori, fa spesso dubitare della loro origine mentre ciò è proprio caratteristico del cedimento differenziale poiché le strutture in elevazione sono dapprima consenzienti, con deformazioni elastiche e plastiche, non appariscenti, e solo dopo

un certo tempo, quando sia superata la resistenza del materiale, appaiono le lesioni, peraltro in una rete ben espressiva dal carattere del cedimento.

Nella esposizione considereremo dapprima quei terreni cedevoli di recente origine alluvionale, costituiti da terre sciolte, minute, con alternanze torbose e fortemente intrise di acqua.

Gli strati resistenti di base, di terre più antiche, sono spesso a profondità non raggiungibile cosicché le fondazioni, siano esse superficiali o profonde, restano sempre sospese in un corpo di terra fortemente cedevole e se sono forti i cedimenti assoluti lo sono pure i differenziali poiché le costruzioni inducono negli strati orizzontali sottostanti pressioni che non sono uniformi neppure quando sono uniformi i carichi applicati.

Inoltre gli stessi carichi di opere vicine si diffondono lateralmente nel sottosuolo, con pressioni che si sovrappongono a quelle della costruzione sovrastante, accentuando ulteriormente la disuniformità e la dissimmetria dei diagrammi totali.

E ciò non solo per i carichi dei fabbricati vicini ma anche, ed ancor più, per quelli di alti rilevati: basta riflettere che agli effetti del peso un rilevato di 6 metri equivale ad un fabbricato di circa 30 metri di altezza.

Con i terreni cedevoli si dà spesso la preferenza alle fondazioni su pali, ma nei casi particolarmente disgraziati dei quali ci stiamo occupando, il corpo di terra cede, oltre che per il carico trasmesso dalla fondazione, anche, e principalmente, per il suo naturale assestamento e per l'azione di altri carichi direttamente applicati in superficie (ad es. riporti di terra).

(\*) Dott. Ing. Prof. Carlo CESTELLI GUIDI, Titolare della Cattedra di *Costruzioni in legno, ferro e cemento armato* nella Facoltà di Ingegneria di Roma.

(1) Per ovvie ragioni verrà ommesso ogni riferimento che possa portare alla individuazione dei casi illustrati e comunque ogni critica ai sistemi di fondazione adottati.

Interviene allora il fenomeno cosiddetto dell'*attrito negativo* (2) che ha effetto, in parte, diverso a seconda che i pali raggiungano, o meno, alla punta un solido strato.

In realtà trattasi di una azione tangenziale sul palo (aderenza), prodotta dalla deformazione degli strati laterali, che si abbassano, di entità variabile e che raggiunge il valore massimo ove si produce lo scorrimento della terra lungo il palo (da cui la dizione di « attrito »).

Nel primo caso, ossia quando il palo poggia alla base su uno strato resistente, il cedimento della terra laterale è massimo alla superficie e circa nullo alla quota di base del palo ove si ha lo strato solido.

Il palo riceve così una azione tangenziale verso il basso che è massima nel tratto superiore ove si verificano scorrimenti della terra lungo il palo.

Per forti carichi applicati sul suolo e con terra non ancora assestata e fortemente cedevole, tale tensione tangenziale può avere risultante così elevata da superare lo stesso carico esterno applicato, in testa al palo, talché può prodursi la rottura del terreno, con rifluimento alla punta od anche la rottura dello stesso palo, se l'appoggio è solido.

Nel secondo caso, ossia con pali sospesi nella massa cedente, la resistenza alla punta è pressoché nulla, e quindi i pali cedono con il terreno. Poiché gli abbassamenti della terra sono maggiori in superficie e vanno decrescendo verso il basso, resta individuato un punto neutro, ossia di spostamento relativo nullo, al disopra del quale l'azione tangenziale è negativa ed al disotto positiva e lungo i tratti estremi del palo si hanno scorrimenti.

Va rilevato che in questo caso la terra della parte bassa, che offre resistenza alla penetrazione, cede anche essa per la compressibilità propria e degli strati sottostanti. Appare pertanto chiaramente come la palificata resti veramente in balia del terreno con una situazione di equilibrio in cui da una parte si ha il carico applicato in testa al palo e l'azione tangenziale negativa e dall'altra la reazione tangenziale positiva.

I cedimenti dei pali saranno quindi fortissimi e differiti nel tempo per una continua variazione del suddetto stato di equilibrio intimamente legato al processo di assestamento del sottosuolo.

Ciò fa riflettere che in questi terreni poco credito può darsi ai risultati favorevoli di prove di carico su pali rilevando che l'esito positivo della prova è

(2) Vari autori hanno tentato di trattare teoricamente il fenomeno dell'attrito negativo nel lodevole sforzo di fornire una formula rigorosa per il calcolo del carico supplementare a cui vengono sottoposti i pali, ma le ipotesi e le schematizzazioni da essi poste sono talmente ideali da rendere i risultati del tutto inutilizzabili per la pratica.

Essi considerano infatti il palo singolo o un particolare gruppo di pali, sottosuoli omogenei, una ben definita resistenza alla punta e carichi uniformi in superficie mentre nei casi reali si hanno terreni fortemente eterogenei, incerta cedevolezza del terreno alla punta e carichi applicati del tutto dissimetrici rispetto al palo o gruppi di pali. Ci siamo pertanto convinti che per l'ingegnere è sufficiente, e comunque più logico, considerare il carico supplementare, trasmesso al palo dell'attrito negativo, con la semplice espressione

$$P_n = \alpha \times S \times r$$

una condizione necessaria, ma non sufficiente, a garantire la stabilità di una fondazione.

Con tali situazioni che cosa avviene delle sovrastrutture e quali cautele possono adottarsi?

Se la intelaiatura di fondazione (platea o travi di collegamento dei plinti su pali) è fortemente deformabile (travi basse) i cedimenti differenziali si propagano alla elevazione sottoponendo le strutture, sia verticali che orizzontali, ad un cimento del tutto impreveduto talché si producono in esse importanti distesi.

Se le intelaiature di base del fabbricato hanno invece dimensioni tali da assumere una elevata rigidità, rispetto a quella delle travi dei piani, esse costituiscono uno schermo di protezione poiché le sollecitazioni dovute alla variabilità delle reazioni di sottofondo vengono da esse integralmente assorbite, senza apprezzabili deformazioni, proteggendo quindi le sovrastrutture da dannosi cedimenti differenziali. Non può peraltro evitarsi la rotazione rigida dell'insieme che si riflette in strapiombi, a volta notevoli, principalmente per l'azione di carichi applicati nelle vicinanze, che accentuano la dissimetria delle pressioni nei sottostanti strati cedevoli.

E' particolarmente in alcune zone di espansione della città di Roma che si rinvencono sottosuoli con stratificazioni cedevoli di forte potenza.

Trattasi di alluvioni recenti: limi, argille molli, depositi lignei e torbe dovute alla carbonizzazione, tuttora in atto, di vegetazioni locali.

Basti dire che gli strati di torba, considerati in generale come i peggiori dal punto di vista delle fondazioni, sono, nel caso particolare, i migliori.

Tali materassi alluvionali poggiano su formazioni sedimentarie di argille plioceniche, che costituiscono l'alveo delle valli di erosione degli affluenti del Tevere, ovviro su stratificazioni di ghiaie e sabbie sovrastanti alle argille, del periodo fra il pliocenico ed il quaternario.

Mentre le stratificazioni alluvionali sono pessimi terreni di fondazione, quelle sedimentarie sono atte a sostenere carichi ma queste se affiorano in alcune zone, in altre si rinvencono a profondità irraggiungibile.

### Caso A

Si tratta di un fabbricato fondato su pali del tipo gettato in opera e costipante fortemente la terra laterale, della lunghezza di circa 20 m.

ricercando di volta in volta, in base ad un attento esame della situazione, il valore più appropriato del coefficiente  $\alpha$ .

Tutti sono d'accordo nel ritenere che il valore  $\alpha = 1$  indicato da Terzaghi sia eccessivo e suggeriamo di porre  $\alpha$  variabile fra 0,3 e 0,8 assumendolo tanto maggiore quanto meno consolidato, e comunque più cedevole, è il terreno attraversato, quanto maggiore è la resistenza alla punta, quanto maggiore l'intensità e l'estensione del carico applicato sulla superficie del suolo e quanto minore è la lunghezza del palo.

$S$  è la superficie totale del palo ed  $r$  la azione tangenziale in fase di scorrimento fra terra e palo ( $r = c$  per argille consolidate).

Comunque è evidente che per terreni già consolidati il sovraccarico trasmesso al palo non può superare il peso applicato su quella superficie del terreno che compete al palo stesso.

Appena iniziata la palificata, e dopo terminata, vennero eseguite numerose prove di carico ottenendo ottimi risultati, come si vede nella Fig. 1 nella quale è riportato il diagramma carico-cedimen-

mm e quello residuo allo scarico 0,1 mm mentre il carico di esercizio è di 60 T.

Allo scopo di analizzare la mutua influenzata di pali vicini venne eseguita anche una prova di carico

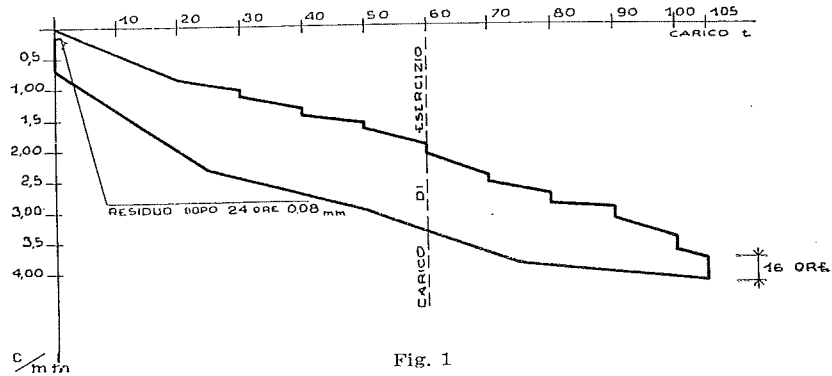


Fig. 1

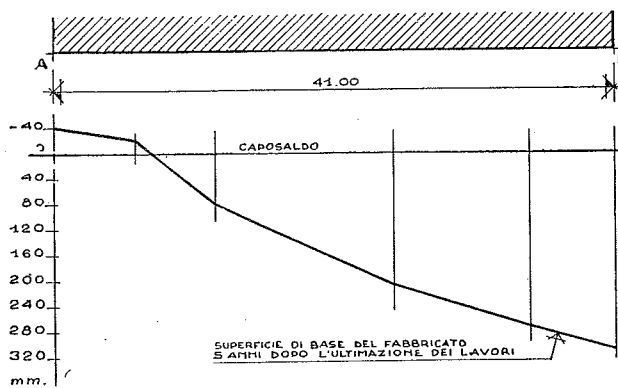


Fig. 2

su due pali ottenendo cedimenti lievemente maggiori, a parità di carico unitario, ma sempre dello stesso ordine di grandezza di quelli del palo singolo.

Già durante la costruzione delle strutture in elevazione le fondazioni ebbero sensibili cedimenti differenziali che proseguirono, dopo l'ultimazione dei lavori, provocando la rotazione di tutto il fabbricato. Nella Fig. 2 è indicata la deformazione della base, rilevata circa 4 anni dopo l'ultimazione dei lavori, e nella Fig. 3 il decorso degli abbassamenti dello spigolo B del fabbricato negli ultimi quattro anni.

Lo spigolo A si sarebbe alzato ma si rileva che dato l'assestamento generale della zona non si ha alcun sicurezza sulla immobilità del caposaldo e quindi probabilmente anche lo spigolo A si è abbassato.

to di un palo situato proprio nella zona del fabbricato ove si sono manifestati i maggiori dissesti.

Il massimo abbassamento per 105 T è stato di 4,2

Nella Figura 4 sono riportati i risultati di due sondaggi eseguiti a breve distanza l'uno dall'altro dai quali si vede la forte eterogeneità delle stratificazioni.

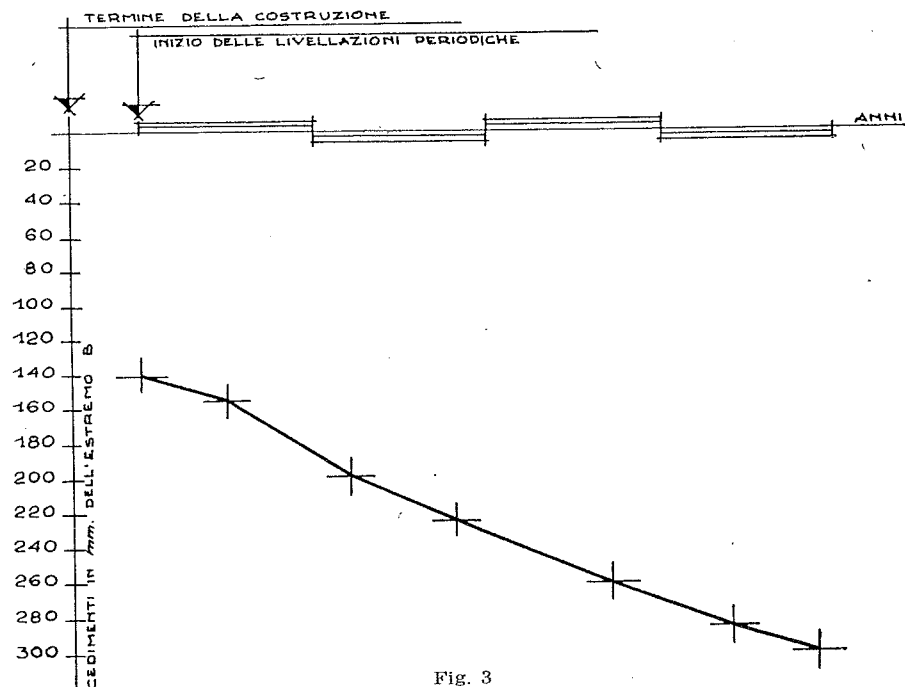


Fig. 3

Prove di Laboratorio sui campioni estratti hanno mostrato la cedevolezza delle terre, saturate di acqua, e la variabilità delle caratteristiche per uno stesso strato.

Ad esempio per lo strato da 18 a 34 del sondag-

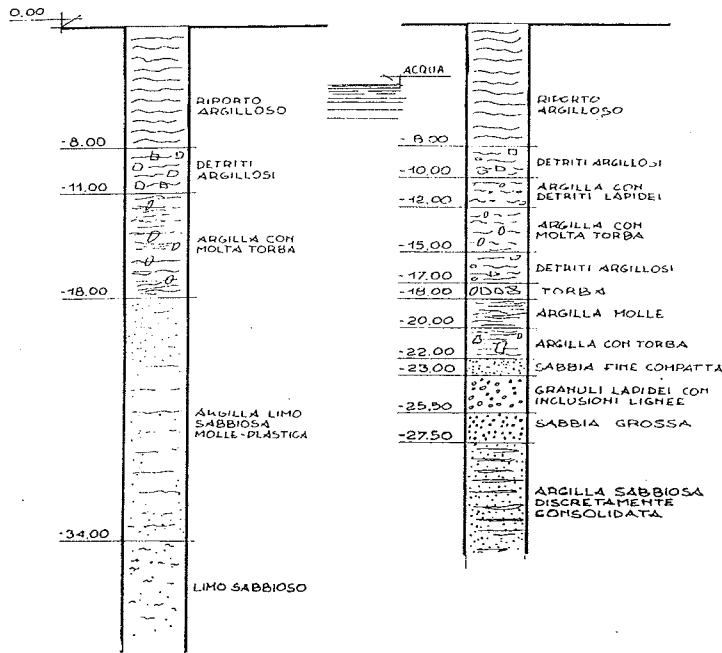


Fig. 4

gio a sinistra della figura si è trovato un notevole peggioramento con l'approfondimento come risulta dal seguente specchio:

|           | LL%  | LP%  | A% | I.P. | I.C. |
|-----------|------|------|----|------|------|
| Quota -20 | 57,6 | 23,8 | 42 | 33,8 | 0,63 |
| Quota -32 | 78,8 | 34,2 | 68 | 44,6 | 0,32 |

Il modulo di compressibilità della terra a quota -20 è  $E = 40 \text{ kg/cm}^2$ .

Osservando la deformazione del basamento del fabbricato si nota una freccia del centro, rispetto alla corda passante per la estremità, confermata dall'orientamento delle notevoli lesioni estese alle murature ed alle strutture in c. a.

L'andamento della curva: cedimenti-tempo della Fig. 3, non mostra quattro anni dopo l'ultimazione dei lavori, tendenza al raggiungimento di una stabilizzazione talché, nell'intento di evitare un aggravamento delle condizioni statiche del fabbricato, è stata prevista la sostituzione delle murature dello scantinato con travi pareti in c. a. atte ad assorbire le sollecitazioni indotte dalla disuniformità delle reazioni del sottofondo.

E poiché il fabbricato è molto lungo, verrà operato un giunto verticale circa a metà, tagliando tutte le strutture e ciò non solo per diminuire le sollecitazioni cui verranno sottoposte le travi pareti, ma anche per alleggerire le strutture in elevazione dallo

stato di tensione prodotto dai movimenti già verificatisi.

Questo caso pone in evidenza quanto sia diverso il comportamento del palo singolo, ed anche del gruppo di due pali, da quello dell'insieme della palificata caricata dal fabbricato.

Infatti la prova di carico ha mostrato che il palo era solidamente ancorato alla terra circostante ed anche solidamente appoggiato alla base, almeno per le 48 ore di durata della prova, ma esso non risentiva della cedevolezza degli strati sottostanti che invece sono stati chiamati in causa dalla palificata dell'esteso fabbricato.

E poiché la potenza degli strati cedevoli era sensibilmente variabile, e molto maggiore sotto lo spigolo B che sotto lo spigolo A, si sono prodotti i dissesti descritti.

### Caso B

Il fabbricato della Fig. 5 è un intensivo su pianta ad L. Durante la sua costruzione venne eseguito il rinterro dei rilevati delle due strade perimetrali che provocarono immediatamente forti cedimenti con inclinazione del fabbricato verso di esse.

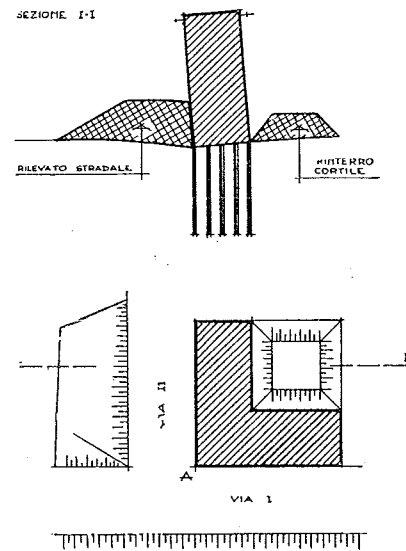


Fig. 5

Contemporaneamente apparvero nelle strutture in elevazione lesioni che, per il loro andamento, individuavano chiaramente la causa in una deformazione congruente al cedimento differenziale della fondazione.

Il fabbricato è fondato su pali del tipo cosiddetto livellato, sospesi in una coltre alluvionale di limi argillosi e stratificazioni torbose per una potenza superiore ai 50 m., esplorati preventivamente con sondaggi. Le prove di carico sui pali, spinte al doppio della portata di esercizio, dettero ottimi risultati.

Iniziatosi il dissesto venne adottato il provvedimento di sostituire le murature di tufo dello scantinato con pareti sottili in c. a. solidamente ancorate ai pilastri, costituendo così perimetralmente e trasversal-

mente all'interno, travi di elevata rigidità. Riteniamo che tale procedimento, ora frequentemente adottato, sia stato sperimentato la prima volta proprio in questo caso.

Poiché il movimento di rotazione del fabbricato verso lo spigolo, all'incrocio delle due strade, proseguiva, si decise di eseguire il rinterro del cortile posteriore nel tentativo di compensare in parte l'azione dei rinterri stradali opposti, simmetrizzando le pressioni negli strati cedevoli sottostanti al fabbricato.

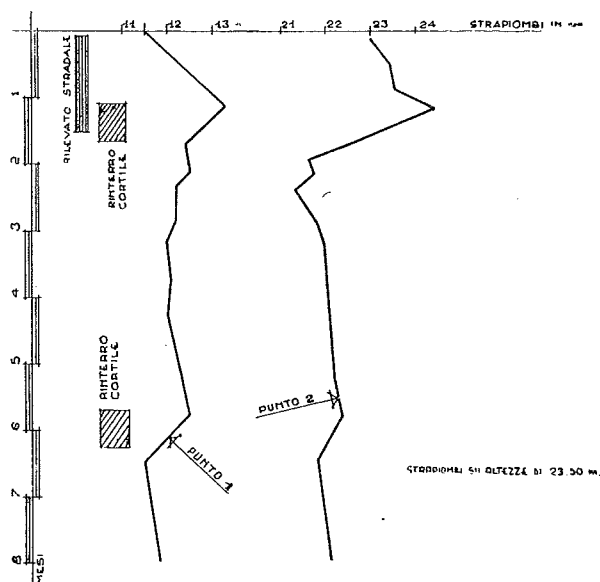


Fig. 6

Il grafico della Fig. 6, nel quale sono segnati gli strapiombi dello spigolo del fabbricato verso le due strade, mostra la grande sensibilità del sottosuolo al peso di rinterri tanto che ad ogni carico di terra nel cortile si verificava immediatamente un cambiamento di segno degli incrementi degli strapiombi.

Peraltro il volume di terra scaricato nel cortile era notevolmente minore (per altezza ed estensione) di quello dei rilevati talché se il grafico pone in evidenza l'effetto immediato, ossia il cedimento primario, mostra pure la prevalenza nel tempo del cedimento secondario prodotto dai rilevati stradali, rispetto a quello prodotto dal rinterro retrostante.

Pertanto l'accorgimento adottato di ricaricare il suolo del cortile ha certamente migliorato la situazione, pur non potendo impedire che il fabbricato seguitasse ad inclinarsi verso le strade.

Il provvedimento della costruzione delle travi pareti ha invece arrestato il progredire dei dissesti della sovrastruttura che sarebbero stati certamente notevoli, come è dimostrato dal fatto che le travi pareti sono state sottoposte a sollecitazioni così elevate da lesionarsi per taglio nonostante la loro notevole sezione trasversale.

Va osservato che nel caso particolare la stessa forma ad L della pianta del fabbricato dà luogo ad una maggiore concentrazione di pressioni nel sottosuolo, proprio in corrispondenza dello spigolo A del

fabbricato, con effetto concomitante a quello dei rilevati stradali.

Il caso esposto mostra la enorme sensibilità di sottosuoli cedevoli alla azione di rinterri vicini, talché occorre procedere alla esecuzione di tutti i rilevati stradali perimetrali ad un fabbricato molto tempo prima di iniziarne la costruzione e tanto maggior tempo si concederà al sottosuolo per assestarsi sotto il peso di essi, tanto minore sarà l'influenza dei cedimenti sul fabbricato.

Con i terreni cedevoli sarà poi opportuno evitare fabbricati a pianta di L, C ecc. adottando piante rettangolari o comunque con due assi ortogonali di simmetria.

### Caso C

Trattasi di un capannone di dimensioni in pianta di m 25 × 65.

I pilastri di sostegno della copertura poggiano su pali del tipo trivellato di circa 18 m. sottoposti al carico di esercizio di 40 t/palo: le prove di carico spinte ad 80 t dettero ottimi risultati.

I plinti dei pilastri sono collegati da una trave perimetrale in c.a. che ancor prima di iniziare la costruzione delle sovrastrutture, ossia quando i pali di fondazione erano praticamente scarichi, manifestarono delle lesioni diffuse, ad andamento verticale, maggiormente aperte nella parte alta delle travi.

Queste vennero dapprima attribuite a fenomeni di ritiro, ma procedutosi all'edificazione della sovrastruttura, si notò il loro aggravamento e successivamente apparvero lesioni anche nelle travi di copertura.

Procedutosi alla livellazione delle travi longitudinali di fondazione risultò una evidente deformazione con incurvamento nel piano verticale del loro asse che dava spiegazione dei dissesti verificatisi.

Il fatto che il cedimento differenziale fosse iniziato prima della costruzione della sovrastruttura mostrava chiaramente che il fenomeno doveva essere prodotto da cause estranee alla applicazione di carichi sulle fondazioni ed infatti risultò che per la formazione del piano del pavimento del capannone e del piazzale antistante era stato eseguito circa 6 mesi prima un rinterro, sul piano di campagna originario, di altezza variabile da pochi centimetri ad una estremità a 4 m. all'altra, come indicato nello schema della Fig. 7.

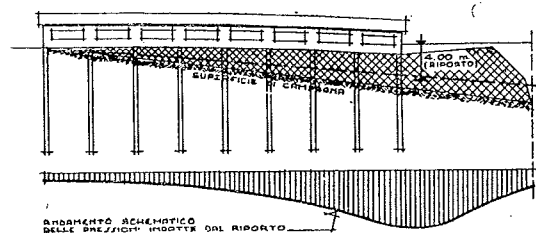


Fig. 7

Eseguiti i sondaggi è risultato un sottosuolo limi argillosi con elementi torbosi per notevole profondità, e quindi molto sensibile alla azione di so-

vraccarichi, talché l'esteso rilevato produceva un lento costipamento con cedimenti proporzionali alle pressioni nel sottosuolo, il cui andamento è schematicamente rappresentato nella Fig. 7.

I pali sospesi in tale massa cedevole venivano trascinati da essa benché scarichi.

guité, fra i pilastri, sottili pareti in c. a. per l'altezza di 4 m.

Dal grafico della fig. 7 si vede che a distanza di circa 4 anni dalla esecuzione del rilevato si sta raggiungendo l'assestamento del terreno.

Questo caso mostra l'effetto di rilevati a spessore

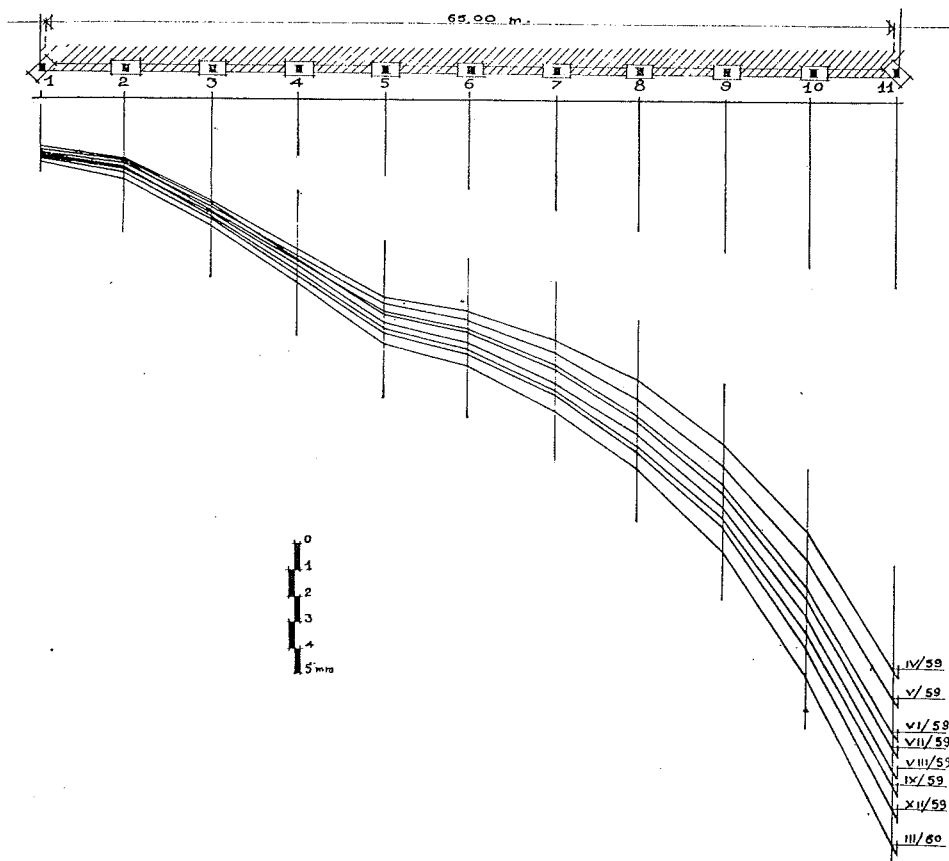


Fig. 8

Accertate le cause del fenomeno vennero giudicate del tutto inutili opere di sottofondazione mentre, per arrestare il progredire di dissesti, vennero ese-

variabile sui terreni cedevoli e pone in rilievo la necessità che questi vengano eseguiti molto tempo prima della costruzione.

**SUMMARY:** In a short introduction the dangers that structures resting on compressible soils are indicated, mostly because such soils are sensible to changes in loading conditions, and, in the case of pile foundations, because of negative friction.

This paper is the first of a series in which typical cases of failure are described. The causes of failure and remedies proposed by the Author and adopted are also indicated.

The first two cases referred to in this paper, deal with settlements caused by the compacting action of embankments, the third one with differential settlements due to variable thickness of compressible layer. The non reliability of successful load tests on piles is especially demonstrated.

**SOMMAIRE:** L'Auteur dans une breve prémiss rappelle les dangers aux quels sont exposées les structures qui s'élèvent sur des terrains qui se affaissent, principalement par leur sensibilité aux changements des conditions de sollicitation et, si les fondations sont sur des pieux, par le phénomène du frottement négatif.

Avec cet article l'Auteur commence la description de cas typiques de dérangement mettant en évidence les causes qui les ont produits et les rémedes par lui proposés et adoptés.

Des trois premiers cas illustrés dans cette note deux concernent les affaisements produits par l'action constipant des relevés, le troisième les affaisements différentiels dus à la variabilité d'épaisseur des strates compressibles.

On demontre particulièrement l'insuffisance des bons resultats des essais de charge sur les pieux à assurer la stabilité de la fondation.