

PROVE DI CARICO SU PALI

PIETRO COLOMBO (*)

SOMMARIO: Nella prima parte della nota vengono riportate le norme relative all'esecuzione ed interpretazione delle prove di carico sui pali consigliate in vari paesi; nella seconda parte viene fatto un tentativo di stabilire i limiti, le possibilità e le modalità di esecuzione ed interpretazione delle prove di carico.

Premesse

Lo scopo di una fondazione è di trasmettere il carico della sovrastruttura al terreno in maniera da evitare cedimenti pericolosi.

Una fondazione su pali assolve questo scopo o trasmettendo il carico ad uno strato profondo di terreno resistente (pali resistenti di punta) o diffondendolo su larghi strati di terreno (pali resistenti per attrito).

Per progettare una fondazione su pali, il primo elemento (di cui è necessaria la conoscenza) è la stratigrafia del terreno; essa può dare una prima idea sul comportamento dei pali che si vogliono adottare. Scelta la lunghezza e il tipo di pali bisogna poi determinare il carico di sicurezza ammissibile.

Per la determinazione del carico di sicurezza del palo singolo i metodi di cui disponiamo sono quattro:

- 1) calcolo con formule statiche basandosi sulle caratteristiche meccaniche del terreno;
- 2) prove di penetrazione in profondità;
- 3) formule dinamiche quando si lavori con pali battuti;
- 4) prove di carico.

Di questi quattro procedimenti di determinazione della portata, il primo e il secondo sono essenzialmente di progetto; il terzo e il quarto sono anche di controllo in cantiere.

Il calcolo a mezzo delle comuni formule statiche conduce a risultati generalmente poco sicuri, perché i valori numerici delle caratteristiche del terreno da inserire in esse non sono facilmente determinabili; ed in secondo luogo perché queste formule tengono conto in maniera relativa dei vari tipi di pali come materiale e come modalità di costruzione oltre ad essere discutibili anche nelle ipotesi poste alla loro base.

Solo quando si sia acquistata una certa esperienza su un tipo di palo e sui terreni di fondazione di una regione o località si può ricorrere a queste formule e si è in grado di adottare valori delle caratteristiche del terreno abbastanza sicuri.

Per le ragioni sopra indicate il progetto di regolamento tedesco DIN 1054 (luglio 1951) interdice l'applicazione delle formule statiche, mentre i codici americano e inglese consigliano molta prudenza nel loro uso.

Le prove di penetrazione in profondità molto usate in Olanda ed in Belgio rappresentano un mezzo utilissimo e sicuro per la progettazione dei pali, ma richiedono notevole esperienza sia perché i diagrammi di resistenza presentano ben raramente un andamento regolare, sia perché la prova di penetrazione, e per la rapidità con cui procede l'affondamento e per il materiale con cui è costituito il penetrometro, può rappresentare solo in maniera approssimata il comportamento del palo.

Le formule dinamiche, basate sulla teoria dell'urto di Newton, richiedono pure notevole esperienza sull'interpretazione dei risultati in quanto tengono relativamente conto della diversa forma del palo, dei vari materiali che possono costituirlo, dei diversi tipi di terreni, dei vari tipi di magli.

Il loro uso è perciò generalmente consigliato soltanto per terreni incoerenti (in cui il comportamento dinamico del palo più s'avvicina a quello statico), per piccoli lavori e quindi per piccoli quantitativi di pali; per cui adoperando le formule dinamiche con coefficienti di sicurezza alti, un possibile errore non influisce molto sul costo.

Il codice americano del 1953 ammette l'uso della formula dinamica E.N. per carichi non eccedenti le 15 tonnellate per palo.

Il loro notevole valore pratico sta però nel poter controllare in base al rifiuto una regolarità di infissione e di comportamento di tutta una palificata e il loro uso è corretto con l'adozione di coefficienti e valori adatti, cioè ogni costruttore, che ha una certa esperienza di certi tipi di pali e di certi tipi di terreni, sa quali sono effettivamente i coefficienti di sicurezza che ha a disposizione e il campo di valori (relativi al peso del maglio, peso del palo, rifiuti, tipi di maglio, ecc.) per cui i risultati danno affidamento.

Dei quattro metodi indubbiamente le prove di carico costituiscono quello più sicuro con concorde parere di studiosi e tecnici.

(*) Dott. Ing. Pietro COLOMBO, Assistente presso l'Istituto di Costruzioni Marittime e Centro Geotecnico Veneto dell'Università di Padova.

Scopi e modalità di esecuzione delle prove di carico

La prova di carico viene generalmente effettuata su un singolo palo, solo in qualche caso eccezionale viene fatta sui pali in gruppo.

Non si deve quindi dimenticare che l'aver adottato come carico di lavoro il carico di sicurezza del singolo palo non è necessariamente una soluzione buona in quanto si possono avere cedimenti eccessivi o rottura completa per non aver tenuto conto del comportamento dei pali in gruppo.

Un palo di prova è un palo su cui vengono posti carichi noti per determinare la sua capacità portante e per misurare l'entità dei cedimenti sotto i vari carichi.

Lo scopo della prova può essere: a) guidare il progettista nella scelta di un tipo adatto di palo e della sua capacità portante; b) confermare l'ipotesi di progetto e controllare la qualità del lavoro.

Nel primo caso i pali di prova sono infissi appositamente e provati prima dell'inizio della costruzione per poter servire come base di progetto. Nel secondo caso il progettista, avendo già stabilito il tipo di palo e il carico di progetto, sceglie alcuni fra i pali infissi per la costruzione dell'opera e li assoggetta alla prova di carico.

I pali di prova evidentemente devono essere delle stesse dimensioni dei pali che si adotteranno nella costruzione, e, se costruiti fuori opera, infissi con la stessa attrezzatura che verrà adoperata all'atto esecutivo, in modo da avere la garanzia di un comportamento confrontabile con quello dei pali della costruzione.

Alcune volte in fase di studio prima della progettazione, può invece essere necessario adottare speciali pali di prova di grande lunghezza ed atti a resistere anche a grandi sforzi d'infissione.

In genere il carico di prova viene trasmesso attraverso un martinetto inserito tra la testa del palo ed il contrasto opportuno. Questo contrasto può essere costituito o da una piattaforma costruita sopra il palo, opportunamente bilanciata e caricata, oppure la poutrelles collegate a pali di ancoraggio opportunamente distanziati dal palo di prova.

Il codice americano e quello inglese consigliano una distanza di m 1,50, il tedesco una distanza minima di m 1,60 e possibilmente m 2.

Alcuni studiosi sconsigliano apertamente il loro uso salvo a porli a distanze praticamente proibitive.

Se la prova di carico viene fatta su pali che in seguito servono da fondazione il carico non deve raggiungere il doppio del carico di lavoro. Se invece viene fatta su pali di prova, se è possibile, si deve continuare ad aumentare il carico fino a che la rottura sia raggiunta o chiaramente indicata.

Nel caso di pali infissi, secondo il codice inglese delle fondazioni [3] « il maggior tempo possibile deve essere lasciato tra l'infissione e la prova di carico in modo da permettere una stabilizzazione delle condizioni del terreno intorno al palo ».

Secondo il regolamento tedesco del 1940 [8] « la prova di carico non deve essere iniziata prima di 24 ore dalla fine dell'infissione, e per terreni coerenti dopo almeno 5 giorni »; secondo il regolamento tedesco del 1953 [4] i tempi sopra indicati sono rispetti-

vamente di 2 giorni per i terreni incoerenti e di tre settimane per quelli coerenti.

Per quanto riguarda le modalità con cui la prova deve essere condotta nel tempo, si ricordano le seguenti avvertenze.

Secondo il codice inglese sulle fondazioni [3]: « i carichi di prova devono, se possibile, essere applicati con eguali incrementi, e ad intervalli di tempo tali che tutto il cedimento osservabile sotto ogni incremento sia cessato prima di applicare il nuovo carico. Il carico poi deve venire rimosso ad intervalli eguali e lasciato un tempo sufficiente a garantire che il ritorno sotto ogni diminuzione di carico sia completo ».

Secondo il codice americano [2]: « si deve applicare il carico con incrementi di 5-10 ton. e fare le letture dei cedimenti per tutto un lungo periodo di tempo ad ogni incremento di carico. Quando il carico di progetto sia raggiunto, deve essere mantenuto fino a che non si abbia alcun cedimento in 24 ore. Il carico deve poi essere aumentato del 50% e mantenuto fino a che non si abbia ancora alcun cedimento per almeno 24 ore. Nello scarico si devono fare le letture ad intervalli ed una lettura finale a scarico completo ».

Secondo il regolamento della città di New York [20]: « la prova deve raggiungere il doppio del carico di lavoro previsto con sei incrementi di carico eguali a $1/2$, $3/4$, $1,1$, $1/4,1$, $1/2,1$, $3/4,2$ volte il carico di lavoro. Le letture dei cedimenti e dei ritorni devono essere fatte con una approssimazione di 0,001 ft (0,3 mm) per ogni variazione di carico. Gli incrementi di carico devono essere fatti quando non ci sia stato alcun cedimento per 2 ore. Il carico di prova deve essere mantenuto fino a che il cedimento non eccede i 0,001 ft in 48 ore e solo allora potrà essere rimosso con decrementi non maggiori di $1/4$ del carico di prova finale ad intervalli di un'ora ».

Secondo il regolamento tedesco del 1940 e 1953 [4]: « il carico deve essere aumentato gradualmente. Gli incrementi devono essere scelti in maniera che il diagramma carico-cedimenti si lasci disegnare chiaramente ».

« Ogni carico deve essere mantenuto fino a che il cedimento del palo non aumenta di una quantità misurabile. Ciò si può stabilire tracciando il diagramma tempo-cedimenti. Dopo lo scarico si misura il cedimento permanente che è particolarmente importante quando si abbiano carichi accidentali notevoli. Per ovviare poi al troppo rapido cedimento del palo si diminuiscono progressivamente gli aumenti di carico ».

Dall'articolo del Lake [13] riportato in bibliografia: « il carico deve essere applicato con incrementi di 5-10 ton. quando si usi il martinetto e di 10-20 ton. quando si usi una semplice piattaforma di carico. Eventualmente si possono anche applicare grandi aumenti di carico all'inizio della prova riducendo gli incrementi all'aumentare del cedimento corrispondente. L'incremento di carico deve essere fatto quando il cedimento del palo sia virtualmente cessato, il che si può vedere facendo per ogni carico un numero adeguato di letture dei cedimenti e tracciando il diagramma tempo-cedimenti.

Un tale procedimento è particolarmente necessario per pali infissi in terreni coerenti e come valore orientativo, non si dovrebbe avere un aumento di cedimen-

to maggiore di 0,02 in. (0,5 mm) in 6 ore prima di aumentare il carico.

Il ritorno elastico del palo dovrebbe essere misurato in corrispondenza del carico di lavoro proposto e del massimo carico raggiunto. Per pali soggetti a grandi variazioni nel carico di lavoro è conveniente durante la prova ridurre il carico al minimo ogni volta che lo si aumenta, poiché l'entità dei cedimenti che si hanno durante una prova di carico dipende, per diversi tipi di terreno, in notevole misura dal numero di scarichi a cui è stato sottoposto il palo.

Un procedimento di carico del tutto particolare viene usato in Svezia e Norvegia per pali in legno o in ferro infissi nelle argille molli caratteristiche di questi paesi.

Il carico viene aumentato di 1 ton. ogni 5 minuti fino a che il palo s'infigge nel terreno ad una velocità di 0,6 mm/minuto (carico di rottura), viene quindi fatto lo scarico e misurato il ritorno elastico (figura 1) [7].

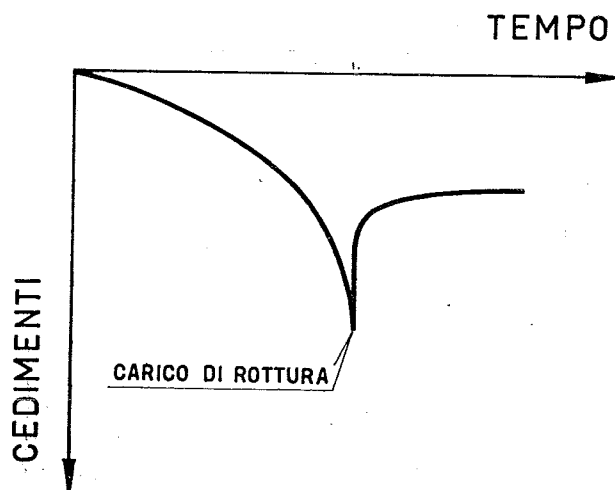


Fig. 1

Regole per l'interpretazione delle prove di carico

Si può definire come carico ammissibile il carico che può essere applicato con sicurezza ad un palo dopo aver tenuto conto del carico di rottura, della distanza tra i pali, della capacità portante del terreno al disotto del palo e del cedimento assoluto e differenziale ammissibile.

Le regole usate nei diversi paesi per la scelta del carico ammissibile sono molto varie in dipendenza e della esperienza relativa ad alcuni tipi di terreni e pali di chi le ha enunciate e in dipendenza delle modalità con cui viene condotta la prova di carico.

Riportiamo qui di seguito alcune di queste regole:

1) Nel regolamento tedesco del 1940 come carico ammissibile si indica quello che corrisponde ai 2/5 del carico di rottura trovato nel corso della prova di carico o ai 2/5 del carico massimo raggiunto nella prova; nel regolamento del 1953 si indica invece 1/2 del carico di rottura [4].

2) In Francia il carico ammissibile viene scelto eguale a 28/100 o 30/100 del carico di rottura op-

pure il più piccolo dei tre valori seguenti: 1/2 di quello che dà 20 mm di cedimento, 2/3 di quello che dà 10 mm di cedimento, quello che dà 5 mm di cedimento [5].

3) In Belgio le compagnie di assicurazione usano specificare che il movimento della testa del palo non deve eccedere i 2,5 mm sotto il carico effettivo e i 5 mm sotto 1,5 volte questo carico [6].

4) In America per i pali di legno infissi in sabbia per conche di navigazione è stato adoperato con buon successo il criterio di scegliere come carico ammissibile quello corrispondente a cedimenti di 0,02 piedi (circa 6 mm) [6].

5) Il « New York City Code » indica come massimo carico di lavoro accettabile quel carico che causa un cedimento netto di non più di 0,01 pollici per ton. del totale carico di prova o metà del carico che causa un cedimento totale di 1 pollice (2,54 cm) e quello che dei due è minore; come cedimento netto si definisce il cedimento totale sotto il carico meno il ritorno del palo dopo che il carico è rimosso [10].

6) Il « Boston Building Code » indica invece come carico di sicurezza metà del carico corrispondente a un cedimento netto (plastico) di 1/2 pollice (1,27 cm) che rimane costante per 48 ore.

7) Secondo il « Department of public Works, State of California »; « Pacific Coast Uniform Building Code »; « Chicago Building Code », si deve scegliere metà del carico corrispondente al punto nel quale non essendo avvenuto alcun cedimento per 24 ore, il cedimento totale (incluso l'elastico) del palo non è superiore a 0,01 pollice (0,025 cm) per ton. di carico di prova.

8) L'AASHO indica invece il carico corrispondente al punto nel quale il cedimento netto (plastico) dopo ritorno è 0,25 pollici (0,63 cm).

9) Secondo il « Building laws of the City of New York » le prove dovrebbero essere fatte con il 200% del carico proposto e considerato questo insoddisfacente se, dopo 24 ore, il cedimento netto totale dopo il ritorno è maggiore di 0,01 pollici per ton. del totale carico di prova.

10) L'ingegnere W. H. Rabe del Bureau of Bridges State of Ohio, indica come scelta il punto nel quale il cedimento totale comincia ad eccedere i 0,03 pollici (0,76 mm) per ton. di carico e consiglia di dividere per un coefficiente di sicurezza 2 per carichi statici e 3 per carichi vibratorii.

11) Secondo il « New York State Department of Public Works »; « Louisiana department of Highways », il carico ammissibile deve essere considerato come il 50% di quel carico che, dopo 48 ore di applicazione causa un cedimento permanente di non più di 1/4 di pollice (0,63 cm).

12) Il « Los Angeles Building Code », consiglia come carico di sicurezza la metà del carico con cui si produce un aumento dei cedimenti sproporzionato all'aumento di carico.

13) Secondo W. Simpson, Foundations, Constable & Co. Ltd, London 1928, per strutture permanenti importanti prendere un carico ammissibile su pali di legno o cemento armato infissi con un rifiuto finale di 10 colpi per pollice, da 1/2 a 2/3 del carico di prova che produce un cedimento finale graduato di 1/2 pollice (1,27 cm) dopo un periodo di 10 giorni; per pali di calcestruzzo incamiciati e non infissi, provati al doppio della loro presunta capacità portante, il carico ammissibile in pratica verrà invece preso 1/2 del carico di prova che dà un cedimento di 3/8 di pollice (0,95 cm) dopo un periodo di 10 giorni.

Cedimento del palo sotto l'azione del carico e centro di resistenza

Il movimento della testa di un palo è causato dalla deformazione elastica del palo e del terreno e dalla deformazione plastica del terreno.

La prima deformazione è sempre di entità piuttosto limitata, la deformazione plastica invece causa i maggiori cedimenti ed è questa principalmente che si cerca di apprezzare con la prova di carico.

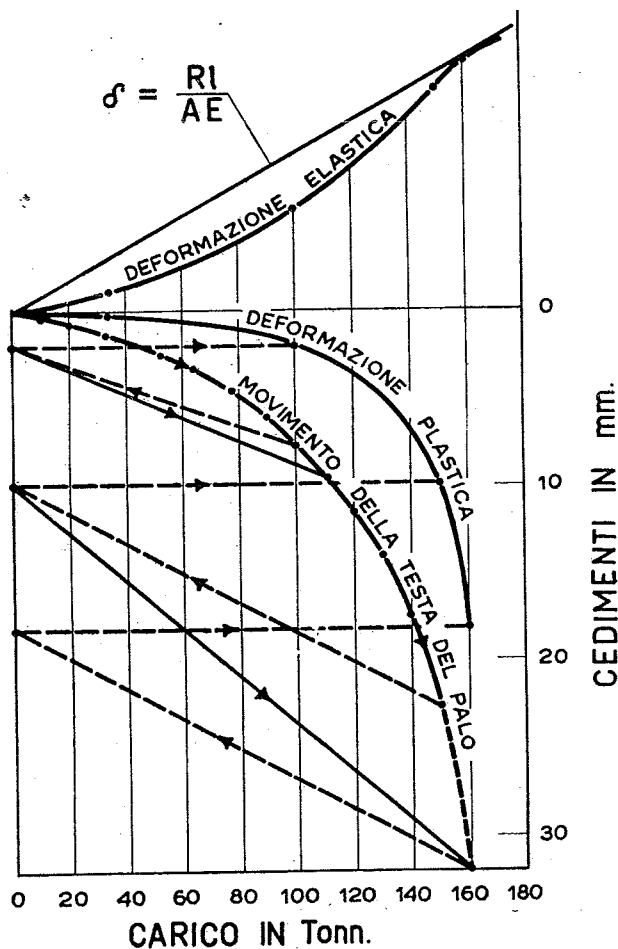


Fig. 2

Attraverso la misura separata della deformazione elastica e plastica si può anche farsi un'idea del comportamento del palo rispetto al terreno, cioè si può all'incirca determinare la posizione del centro di resistenza.

La misura della deformazione elastica e plastica può essere fatta con i carichi ciclici, cioè durante il processo di aumento del carico per incrementi esso viene rimosso parecchie volte e riportando i ritorni corrispondenti a ciascun carico si ottiene la curva di deformazione plastica (fig. 2).

I punti dove i ritorni intersecano l'asse dei cedimenti sono riportati orizzontalmente sotto i rispettivi carichi rimossi e quindi congiunti con una curva (curva di deformazione plastica). Sottraendo i valori di questa curva da quelli della curva di cedimento totale si ricava la curva di deformazione elastica del palo.

La deformazione elastica teorica nel caso di un palo resistente di punta e non d'attrito può essere calcolata con la formula

$$\delta = \frac{R L}{A E}$$

in cui

δ = deformazione elastica;

R = carico;

L = lunghezza;

A = sezione;

E = modulo di elasticità

e viene rappresentata da una retta.

Per altre condizioni la deformazione elastica del palo può essere calcolata variando la posizione del centro di resistenza e quindi di L.

Coll'osservare la differenza tra la curva di deformazione elastica effettiva del palo e quella teorica si può vedere il graduale abbassamento del centro di resistenza all'aumentare del carico e quindi controllare se con la prova sia stato trasmesso il carico sullo strato di terreno che si desiderava provare. Cioè basta sostituire nella formula

$$\delta = \frac{R L}{A E}$$

le deformazioni lette dalla curva ottenuta dalla prova ciclica e ricavare L che dà la posizione del centro di resistenza con i vari carichi.

Naturalmente tutto ciò vale trascurando la deformazione elastica del terreno.

Un altro metodo per misurare la deformazione elastica del palo e quindi determinare la posizione del centro di resistenza è quello della misura diretta della deformazione. Cioè nel palo vengono inseriti dei tubi di ferro fermati alle altezze desiderate ad es. a 1/4, 1/2, 3/4 e per l'intera altezza. Dei tondini inseriti nei tubi, fissi all'altezza desiderata e liberi all'altra estremità danno la misura degli abbassamenti

alle varie quote; un esempio del metodo è riportato in fig. 3 [15].

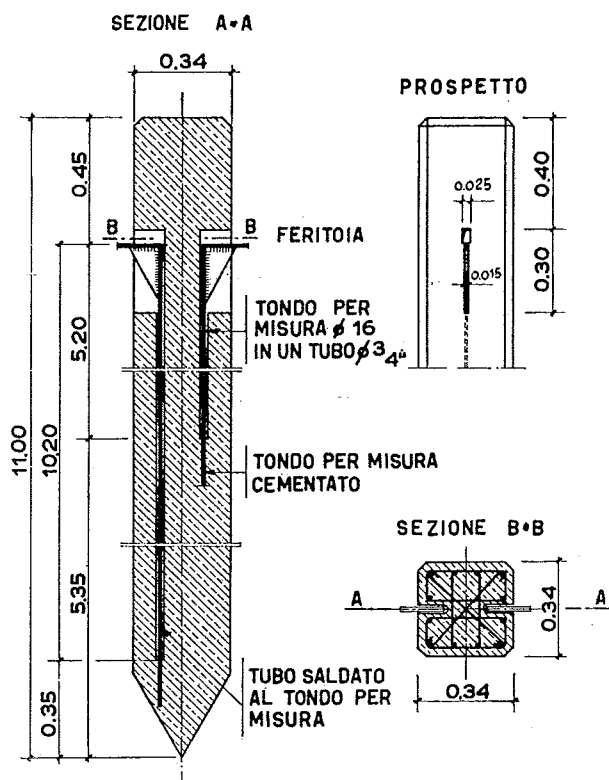


Fig. 3

Un metodo analogo è quello di inserire dei misuratori di pressione alle varie altezze con cui si può risalire alla determinazione del centro di resistenza.

Il problema sopraindicato, della trasmissione del carico dal palo al terreno, è di particolare importanza specialmente per poter prevedere il comportamento dei pali in gruppo.

Alcune volte poi o per il particolare tipo di costruzione che può richiedere l'assenza quasi assoluta di cedimenti differenziali o per gli elevati carichi che si vogliono affidare al palo, può essere necessario conoscere la capacità portante della sola parte di palo infissa in uno strato di sabbia compatta ad una certa profondità. In tal caso il problema può essere risolto caricando un palo infisso fino a circa 1 metro sopra lo strato di sabbia, e uno infisso nella sabbia e determinando la capacità portante del palo in sabbia come differenza. Da notare poi che la maggior parte del cedimento è impedita dalla resistenza di punta del palo ed è quindi questa che si deve garantire nei casi speciali sopraindicati.

Realizzazione pratica delle prove di carico

Abbiamo già detto che le prove di carico sono un mezzo di scelta del carico di sicurezza del palo e di controllo del carico di lavoro.

Per poter arrivare a questa scelta bisogna però tenere presente vari fattori d'ordine tecnico e d'ordine pratico.

Innanzitutto i risultati della prova di carico possono essere interpretati e usati con pieno vantaggio

solamente quando sono accompagnati dalla stratigrafia del terreno nelle immediate vicinanze e, se possibile, dai risultati delle prove di laboratorio su campioni indisturbati ottenuti da sondaggi adiacenti.

I valori dei carichi che generalmente si affidano ai pali di fondazione variano dalle 15 alle 60 ton. Solo per alcuni tipi di pali e quando si presentino circostanze particolarmente favorevoli si arriva alle 80-100 ton. I valori dei carichi però oscillano più frequentemente tra le 20 e le 40 ton; valori che si riferiscono ai diametri comunemente usati e a lunghezze medie di pali e sono in relazione alla distanza tra i pali, distanza che per risultare economica e dare d'altra parte una certa sicurezza varia tra 0,7 e 1,8 m. Entro tali limiti, si possono realizzare delle economie nelle strutture di fondazione di collegamento dei pali ed ottenere il vantaggio, in caso di cattiva esecuzione di un palo, cattiva infissione, oppure deficiente resistenza a causa di qualche anomalia del terreno, di poter scaricare il carico del palo difettoso sui pali vicini senza avvicinarsi troppo al carico di rottura e senza cementare pericolosamente le strutture di collegamento. Infine cedimenti differenziali per variazioni di compattezza del terreno saranno meno forti e quindi meno pericolosi per le strutture della costruzione.

Con queste considerazioni abbiamo così delimitato il campo dei carichi usuali sui pali in 20-40 ton.

Premesso questo, credo si possa ammettere come soluzione tecnica ideale per la prova di carico, l'arrivare alla rottura aumentando il carico con piccoli incrementi e mantenendolo ogni volta sul palo fino a che sia praticamente cessato ogni cedimento.

Altra soluzione buona per analizzare bene il comportamento del palo è quella già citata, di sottoporlo a carichi ciclici frequenti.

Per quanto riguarda la necessità di raggiungere il carico di rottura si può far notare questo: poiché il coefficiente di sicurezza alla rottura può variare tra 2 e 3, il carico di rottura usualmente potrà variare da 40 a 120 ton. Il realizzare un contrasto di 100 ton. è già una condizione notevolmente onerosa e difficile sia ricorrendo ad una piattaforma opportunamente caricata sia a 2 o 4 pali a trazione.

L'arrivare quindi al carico di rottura non può essere sempre facile nè possibile. I valori minori cioè dell'ordine delle 40-80 ton. si hanno però per pali in fanghi ed argille molli per i quali la conoscenza del carico di rottura è più importante mentre interessa meno per pali in terreni sabbiosi e in argille compatte dove con facilità si arriva a valori di 100 e più ton.

Un altro punto da esaminare è quello che riguarda la grandezza da dare agli incrementi ed il tempo che si deve aspettare dopo ogni incremento.

Gli incrementi dovrebbero essere abbastanza piccoli poiché il carico reale è, quasi sempre, posto molto lentamente sopra il palo, e d'altra parte il cedimento corrispondente a un dato carico raggiunto con piccoli incrementi è maggiore del cedimento sotto lo stesso carico ma applicato al suo valore massimo pur avendolo lasciato per lo stesso tempo. Per quanto riguarda il tempo di prova abbiamo già visto come tutti consigliano di aspettare dopo ogni incremento, che il cedimento sia praticamente cessato, condizione questa che, mentre per terreni incoerenti può essere facilmente

rispettata, per terreni coerenti lo è molto più difficilmente per il lungo tempo richiesto.

Quando sia necessario un tempo molto lungo si presentano varie difficoltà d'ordine pratico: sbalzi di temperatura, cambiamenti di tempo, inconvenienti che facilmente si possono verificare in cantiere, possono influire nelle apparecchiature di misura dei cedimenti; occorre poi avere un martinetto a regolazione automatica per mantenere il carico sul palo costante per il tempo desiderato.

La prova molto lunga può essere di intralcio a necessità di progetto o di cantiere.

Per le ragioni sopraindicate le prove di carico vengono necessariamente semplificate. Le semplificazioni devono essere però tali da non falsare i risultati, cioè si devono ottenere risultati sicuri e tali da poter essere interpretati con una certa facilità e fiducia.

Una semplificazione comune della prova di carico è quella di prefiggere il carico di lavoro e condurre la prova misurando il cedimento sotto questo carico raggiunto rapidamente ma mantenuto molto a lungo (24 ore e più); poi sotto un carico 1,5 o 2 volte il carico di lavoro, pure questo carico mantenuto molto a lungo e raggiungendo infine il carico di rottura rapidamente.

Un altro procedimento è quello di condurre intercalando vari ritorni rapidamente la prova fino alla rottura.

Chi conduce la prova poi in relazione alla sua esperienza pratica relativa ai terreni di una regione o a particolari tipi di palo sa quali modalità può adottare senza modificare radicalmente i risultati.

Esame dei risultati della prova di carico

Eseguita la prova bisogna analizzarne i risultati, vedere se siano soddisfacenti, se confortino una previsione fatta e se permettano di scegliere con sicurezza il carico ammissibile. Comunque per prima cosa quando si ottengono dei risultati strani si devono controllare e tarare le apparecchiature di prova (contrasto e martinetto), e di misura dei cedimenti che generalmente sono la causa principale di essi. Ne consegue che in ogni caso quando si riportano dei risultati essi devono essere accompagnati da una relazione molto accurata e precisa sul modo con cui è stata apprestata e condotta la prova e su quello che si è potuto osservare durante la sua esecuzione.

Questa è una condizione essenziale per l'esatta interpretazione.

In secondo luogo bisogna tener presente i fattori inerenti alla prova di carico di per se stessa.

Abbiamo visto come venga eseguita in diverse maniere per necessità pratiche: di conseguenza bisogna far riferimento alla velocità con cui è condotta la prova, al carico massimo raggiunto e alla scelta del carico di rottura. E' sottinteso che è necessario conoscere bene la stratigrafia del terreno.

Da prove sperimentali è stato visto che i risultati di un palo infisso interamente in sabbia non sono, influenzati dalla velocità di prova. Ciò molto probabilmente vale anche per i pali infissi con la punta nella sabbia. Bisogna però essere certi che la maggior par-

te del carico venga trasferito alla sabbia, del che ci si può in certo qual modo assicurare con l'eseguire vari ritorni e controllare così l'abbassamento del centro di resistenza.

Se il palo invece viene sostenuto anche per attrito da strati argillosi superiori (fig. 4) è probabile che la velocità di prova agisca in maniera negativa.

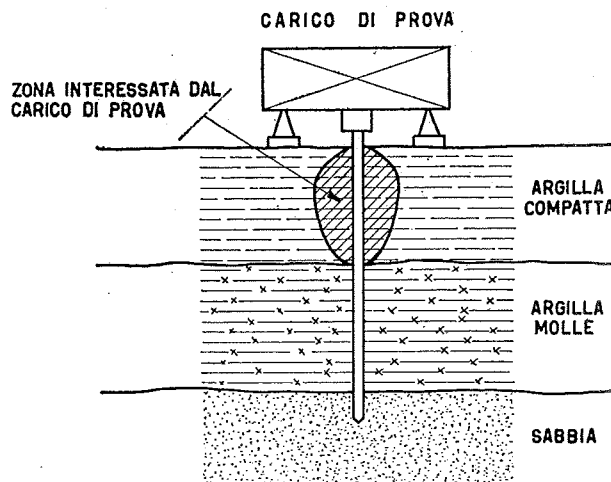


Fig. 4

Ciò darà valori più alti di quelli ottenuti con una prova lenta. Quando il palo sia interamente in terreni coerenti, fanghi ed argilla, allora i risultati che si ottengono possono essere notevolmente diversi. Aumentando la velocità di prova si può ottenere sia un miglioramento che un peggioramento [14].

Tale variabilità di risultati dipende da molti fattori: proprietà delle argille, maggiore o minore sensibilità, umidità, compattezza, particolare configurazione stratigrafica, diverso tipo di palo come materiale, come forma, come metodo di infissione o di costruzione.

Non è però facile riuscire ad individuare quali di questi fattori e in che maniera abbiano influenzato i risultati. E qui necessariamente deve soccorrere la esperienza.

Comunque si può dire questo, rifacendosi ai vari codici e regolamenti: la prova deve essere, nei limiti del possibile e pratico, condotta lentamente in analogia a quanto vien fatto generalmente durante la costruzione.

Passando ad esaminare la determinazione del carico di rottura del palo premettiamo che:

il carico di rottura può essere definito come il massimo carico che un palo può sopportare e sotto cui il palo continua a cedere senza alcun ulteriore incremento di carico. Non sempre però il carico di rottura è raggiungibile con l'attrezzatura di prova, nè si può facilmente determinare dal diagramma carichi-cedimenti.

Da notare che i risultati della prova di carico vengono rappresentati da due diagrammi: uno dei cedimenti in funzione del carico e l'altro dei cedimenti in funzione del tempo (fig. 5).

Generalmente i cedimenti vengono riportati in ordinata e il carico o il tempo in ascissa.

Naturalmente variando le scale dei carichi e dei cedimenti varia la forma della curva. Confrontando

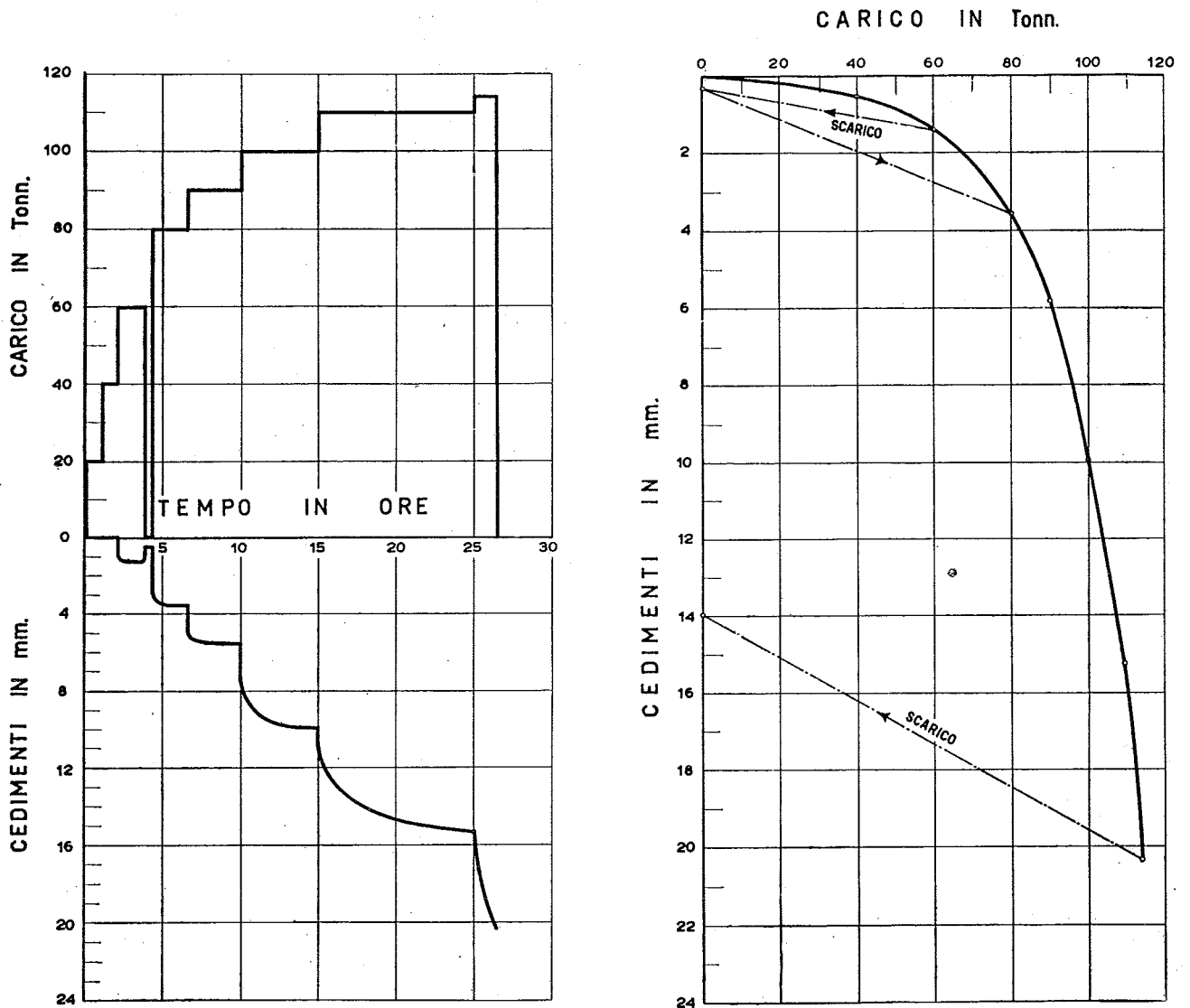


Fig. 5

a parità di scale la forma dei diagrammi di prove fatte su pali di diverso tipo e infissi in terreni differenti si vede che possono variare notevolmente e che se delle volte si può stabilire facilmente il carico di rottura altre volte è difficilmente individuabile.

Nè esaminando in diversi diagrammi si può all'incirca stabilire una forma per pali infissi su sabbia, o pali infissi su argilla, per pali resistenti per attrito o principalmente di base. Dall'esame di un gran numero di prove di carico fatte in Olanda ed in altri paesi, si è visto che si può assumere come carico di rottura quello corrispondente ad un cedimento dell'ordine di un pollice (2,54 cm) [6].

Questo cedimento è abbastanza valido come scelta sia con terreni incoerenti che coerenti e con pali di vario tipo.

Nel caso di pali infissi in terreni incoerenti se si riportano in ascissa i vari carichi come percentuali del carico di rottura ed in ordinata i cedimenti si ottiene una curva che può variare entro limiti abbastanza ristretti (fig. 6) [16].

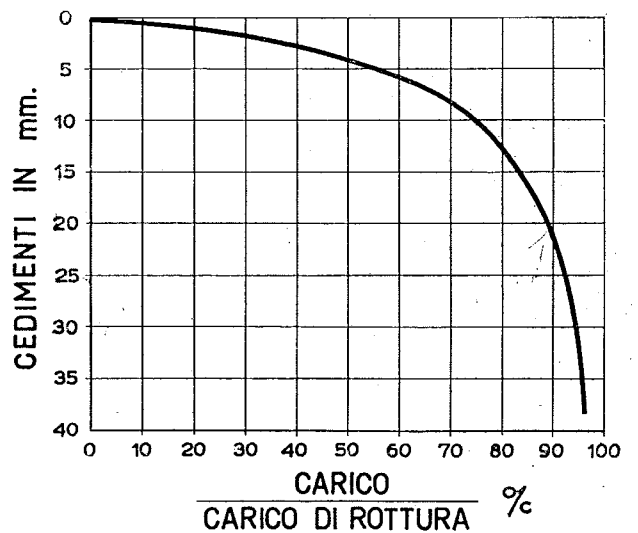


Fig. 6

Se su questa curva si applicano le varie regole di scelta del carico ammissibile si hanno dei valori dei cedimenti del palo dai 2 ai 5 mm.

Scelta del carico ammissibile

Quando si hanno a disposizione i risultati della prova di carico su un singolo palo e questi risultati danno un sicuro affidamento si deve scegliere il carico ammissibile.

Se si conosce il carico di rottura, adottando i coefficienti di sicurezza comunemente usati nei vari campi dell'ingegneria civile, il carico ammissibile potrà variare da $1/3$ a $1/2$ del carico di rottura. Ma evidentemente questa è una scelta troppo semplice che può essere sufficiente solo per alcuni particolari casi. Bisogna tener conto di altri fatti.

Il cedimento di un gruppo di pali è all'incirca eguale alla somma del cedimento ottenuto caricando un singolo palo col carico assegnatogli e del cedimento dovuto alla compressione del terreno al disotto del gruppo di pali. Poiché il secondo aumenta all'aumentare dell'area interessata alla palificata, il cedimento totale aumenterà generalmente all'aumentare delle dimensioni della palificata (naturalmente mantenendo lo stesso carico sul singolo palo) e sarà sempre più grande di quello di un singolo palo.

Sul cedimento totale di una palificata influiscono vari fattori fra i quali principalmente: dimensioni della palificata (come abbiamo già visto), natura del carico permanente o vibratorio, carattere della palificata, tipo di palo e infine principalmente caratteristiche del terreno al disotto dei pali. Ammesso che si possa prevedere il cedimento di una intera palificata, bisogna esaminare se il cedimento totale e principalmente il cedimento differenziale possibile tra le varie parti della struttura non sia pericoloso. Su questo giudizio influiscono: il carattere della struttura come dimensioni e forma, come materiale, come destinazione; la natura del carico prevalentemente permanente o prevalentemente accidentale, ammontare e natura del carico accidentale; distribuzione dei carichi.

Evidentemente tutti questi problemi non potranno essere risolti riferendosi soltanto alla prova di carico ma affiancando a questa, come già è stato detto, la stratigrafia e i risultati di prove di laboratorio su campioni indisturbati, oltre ai dati di infissione se si sono usati pali battuti.

Se i pali sono infissi in sabbia o per lo meno con la punta in sabbia e se questo strato di sabbia può considerarsi praticamente di spessore illimitato agli effetti dei cedimenti con la sola prova di carico si può risolvere il problema. Infatti dal diagramma della prova di carico scegliendo un valore compreso tra $1/2$ e $1/3$ del carico di rottura e comunque applicando le varie regole di scelta del carico ammissibile si vede che si hanno valori corrispondenti del cedimento dai 3 ai 7 mm.

Se una fondazione avesse dei cedimenti assoluti di questo ordine di grandezza evidentemente sarebbe sopradimensionata e ultrasicura. In effetti però per la palificata all'aumentare delle dimensioni corrispondono cedimenti assoluti dell'ordine dagli 1 ai 5 cm

che sono normali e generalmente non pericolosi per le più varie strutture. Si ottengono questi cedimenti in quanto gli strati sabbiosi, salvo casi speciali, sono poco compressibili sotto un carico permanente.

Da notare poi che le portate comunemente richieste vengono ottenute quasi sempre con una infissione nello strato di sabbia della punta del palo dell'ordine di 1 metro o per pali trivellati e battuti in posto con una quasi semplice appoggio sullo strato sabbioso per le maggiori dimensioni della punta del palo.

Passando poi a pali con la punta in strati di argilla compatta quanto detto sopra vale entro limiti più ristretti in quanto l'argilla compatta è generalmente più compressibile della sabbia e quindi molto probabilmente i criteri di scelta sopraesposti si possono applicare per palificate di limitata estensione.

Se invece si hanno pali resistenti solamente per attrito la prova di carico servirà principalmente per indicare il carico di rottura e permettere la scelta del carico ammissibile in relazione a quello di rottura con i consueti coefficienti di resistenza. Bisognerà però anche determinare il carico di rottura dell'intera palificata assimilata ad una fondazione con cassone di grandi dimensioni a mezzo delle solite formule di capacità portante. Ma evidentemente questi calcoli e la conoscenza del carico di rottura sono una condizione necessaria ma non sufficiente per la perfetta efficienza della struttura.

Abbiamo che con pali resistenti per attrito e quindi con terreni generalmente molli e plastici il cedimento dovuto alla compressibilità del terreno può essere molto grande dell'ordine della decina di centimetri con probabili cedimenti differenziali dell'ordine del centimetro.

Necessita quindi fare un calcolo dei cedimenti e del loro decorso nel tempo in relazione alle caratteristiche e modalità costruttive della sovrastruttura facendo delle ipotesi accettabili di distribuzione degli sforzi nel terreno e in base ai risultati di prove edometriche su campioni indisturbati.

Evidentemente i risultati che si ottengono da questi calcoli potranno essere accettabili non tanto riferendosi ai valori assoluti quanto facendo riferimento al loro decorso nel tempo ed alle esigenze della sovrastruttura.

Conclusione

In questa nota si è cercato di raccogliere il maggior numero di norme relative alle prove di carico nei vari paesi, norme che sono l'espressione dell'esperienza e degli studi fatti finora sull'argomento, e di vedere quali sono i limiti, le modalità e possibilità di esecuzione e interpretazione delle prove di carico.

L'argomento come si è visto è notevolmente complesso ed influenzato da moltissimi fattori; si presta perciò ai più svariati apprezzamenti e deduzioni. Appunto per questo mi sembra necessario porre ancora in rilievo la necessità che negli studi o comunque nelle relazioni delle prove di carico siano riportate con la massima accuratezza tutte le modalità di prova seguite ed il maggior numero di osservazioni possibili.

Un altro punto da sottolineare è quello di tener presente che la prova di carico sul singolo palo è una

specie di prova su modello e quindi l'applicazione dei suoi risultati alla realtà deve essere fatta con la necessaria prudenza.

Sia costruttori che progettisti e studiosi sanno benissimo infatti che se si fanno prove di carico su pali delle stesse dimensioni, costruiti nello stesso modo e posti a breve distanza i risultati che si ottengono sono diversi l'uno dall'altro e tale diversità può essere anche notevole.

Appunto per questo bisogna porsi in grado di apprezzare le prove di carico e i dati che da esse si ottengono nel loro giusto valore e limite.

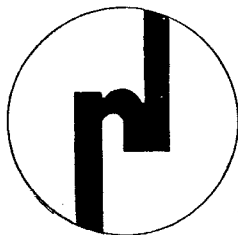
Bibliografia

Tra le numerosissime memorie sull'argomento, vengono qui citate soltanto quelle che hanno più stretta attinenza con esso.

- [1] *Pile foundations and pile structures: ASCE manual of engineering practice n. 27.* - Gennaio 1956 - New York.
- [2] *American standard building code requirements for excavations and foundations: ASCE manual of Engineering practice n. 32.* - Luglio 1952 - New York.
- [3] *Foundations: The institution of Civil Engineers* - Civil Engineering Code of practice n. 4 (1954).
- [4] *Grundbau-Taschenbuch* - Verlag von Wilhem Ernest u. Sohn Berlin 1055.
- [5] *La mécanique des Sols et la force portante des pieux.* - Comunicazioni e discussioni delle giornate della meccanica del terreno, 7-8-9 luglio 1952 - riportate in "Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics", marzo-aprile 1953.
- [6] Discussione e relazione generale su: *Pile foundations, pile loading tests*, riportate in "Proceedings of the second international conference on soil mechanics and foundation engineering", pag. 119-124, vol. VI, Rotterdam, giugno 1948.
- [7] Discussione e relazione generale su: *Piles and pile foundations; settlements of pile foundations*, riportate in: "Proceedings of the third international conference on soil mechanics and foundation engineering", pag. 171-180, Switzerland, 1953.
- [8] *Nouvelles instructions concernant les charges admissibles pour les sols de fondation et pour les fondations sur pilotis.* Annales des travaux publics des Belgique, 1941, aprile, pag. 311-337.
- [9] G. C. BOONSTRA: *Pile loading test at Zwiyndrecht-Holland*, riportato in "Proceedings of the international conference on soil mechanics and foundation engineering", pag. 185-194, vol. I, giugno 1936, Cambridge.
- [10] B. CHELLIS: *Pile foundations*, Mc Graw-Hill, New York, 1951.1
- [11] C. FRANX: *The bearing capacity of piles as derived from deep-sounding, loading test and formulae*, riportato in: "Proceedings of the second international conference on soil mechanics and foundation engineering", pag. 118-121, vol. IV, Rotterdam, giugno 1948.
- [12] C. FRANX: *The carrying capacity of piles as computed from pile loading and pulling test*, riportato in: "Proceedings of the international conference on soil mechanics and foundation engineering", pagine 173-180, vol. I, giugno 1936, Cambridge.
- [13] S. O. LAKE: *Test loading of piles.* Civil Engineering and Public Works Review, novembre 1948, pagine 647-649.
- [14] G. MEARDI: *Osservazioni su alcune prove di carico di pali trivellati in terreni argillosi plastici.* I Convegno di Geotecnica, maggio 1953, Napoli.
- [15] G. MENZE: *Vergleichende Untersuchungen über die Tragfähigkeit von Stahloeton- und Stahlpfählen*, pagine 79-88, Beton- und Stahlbetonbau, aprile 1954.
- [16] G. PLANTEMA: *Results of a special loading-test on a reinforced concrete pile, a so-called pile sounding*, riportato in: "Proceedings of the second international conference on soil mechanics and foundation engineering" - pag. 112-118, vol. IV, Rotterdam, giugno 1948.
- [17] R. SANSONI: *Pali e fondazioni su pali.* Ed. Ulrico Hoepli, Milano, 1955.
- [18] R. SANSONI: *Prove di carico a rottura su pali trivellati.* II Convegno di Geotecnica, settembre 1954, Roma.
- [19] TERZAGHI-PECK: *Soil Mechanics in engineering practice*, Wiley e Sons, New York, 1948.
- [20] S. M. THORNLEY: *New pile code sets load-test criteria.* Engineering, News-Record, maggio 26 1949, pagine 56-59.

SUMMARY: In the first part of the paper the A. refers the rules of execution and interpretation of the pile load tests which are proposed in many countries; in the second part the A. tries to state limits possibilities and methods of these tests.

RESUMÉ: Dans la première partie de l'article on reporte les normes, qui regardent l'exécution et interprétation des essais de mise en charge des pieux conseillées dans les différents pays; dans la deuxième partie on a essayé de établir quels sont les limites, les possibilités et méthodes d'exécution et interprétation des essais de mise en charge des pieux.



PROFIL-LAMINA ITALIANA

S. R. L.

Stabilimento e Amministr.: ROMA - Via Prenestina, 189 - Tel. 735.008 - 730.432

Ufficio Vendite: ROMA - Vicolo San Nicolò da Tolentino, 7 - Tel. 470.357

SERRAMENTI METALLICI
IN PROFIL-LAMINA

- TENDE ALLA VENEZIANA
IN PROFIL-LAMINA DI ALLUMINIO TRATTATO
- PERSIANE AVVOLGIBILI IN LEGNO