

Micropali di elevata capacità portante

C. MASCARDI *

SOMMARIO: La recente introduzione di una particolare tecnologia che permette di eseguire micropali di alcune decine di tonnellate di capacità portante consente nuove applicazioni e pone il problema della stabilità dell'equilibrio elastico.

Viene esposto un metodo per la verifica di stabilità ed è fornita una tabella di valori caratteristici per varie dimensioni dei micropali; infine sono sommariamente indicati i nuovi campi di applicazione che le forti capacità portanti dischiudono.

1. Premessa.

Sono da tempo note le applicazioni dei micropali ottenuti iniettando a modesta pressione ed in una sola operazione malta cementizia in un foro di diametro attorno ai 100 mm.

Negli ultimi anni si è sviluppata una particolare tecnica esecutiva dei micropali⁽¹⁾ che ha consentito di aumentarne notevolmente le prestazioni, allargandone in tal modo il campo di impiego.

Le sostanziali modifiche introdotte rispetto alle precedenti modalità d'esecuzione sono:

a) l'iniezione controllata e ripetuta della parte più profonda del micropalo;

b) l'adozione di una armatura costituita da un tubo in acciaio di grosso spessore anziché da una o più barre di acciaio per c. a.

2. Modalità esecutive.

Si richiama brevemente la procedura impiegata per la costruzione dei micropali in argomento, già altrove illustrata [MASCARDI, TORNAGHI, 1967].

Eseguita la perforazione con il sistema più acconcio alle condizioni che di volta in volta si incontrano (generalmente a rotazione con circolazione diretta di fango bentonitico), viene introdotta nel foro la armatura tubolare. Essa costituisce congiuntamente il mezzo d'opera indispensabile per l'esecuzione di una iniezione ripetuta e controllata e l'elemento strutturale che consente di incassare carichi elevati.

La parte inferiore del tubo reca infatti, in sezioni disposte a intervalli regolari di qualche decimetro, delle semplici valvole di non ritorno che

permettono di iniettare le quantità volute controllando volumi e pressioni di iniezione singolarmente, sezione per sezione, senza che l'eventuale presenza di formazioni particolarmente aperte impedisca il raggiungimento delle pressioni necessarie a far defluire la malta iniettata anche in corrispondenza delle formazioni meno ricettive.

Per ottenere l'indipendenza di una sezione dalle adiacenti, si pone dapprima in opera una « guaina », essa pure costituita da malta cementizia, che occupa lo spazio anulare compreso tra la parete del perforo ed il tubo; a presa avvenuta essa impedisce la migrazione verticale della malta successivamente iniettata a costituzione del « bulbo » di ancoraggio del micropalo nel terreno.

Tale tecnica è analoga a quella già da diversi lustri in uso per le iniezioni in terreni alluvionali [CAMBEFORT, 1963]; è qui tuttavia applicata allo scopo di ottenere non la impregnazione più uniforme possibile del terreno circostante il tubo, ma la formazione lungo di esso di una serie di sbulbature a brevi intervalli che nel loro insieme costituiscono l'organo di trasmissione degli sforzi dal palo al terreno (fig. 1).

Eseguita e ripetuta la fase delle iniezioni nel tratto profondo, il tubo viene riempito nel suo interno di malta ed il micropalo è così ultimato.

3. Risultati di prove.

Le premesse ideali di un buon comportamento di tale tipo di micropalo sono state convalidate da una serie di sperimentazioni e di applicazioni che ne hanno posto in evidenza la versatilità.

È infatti possibile adeguare i volumi iniettati alla deformabilità del terreno in modo da raggiungere capacità portanti sensibilmente uguali in formazioni estremamente diverse, siano esse terreni coerenti o incoerenti di qualunque densità che rocce tenere o profondamente disgregate.

* Dott. Ing. Claudio MASCARDI, della Ing. Giovanni Rodio & C. S.p.A.

⁽¹⁾ Brev. it. n. 698.007.

La prima serie di prove (a trazione) fu eseguita nel 1962-63 a Wallisellen (Svizzera) in un terreno di scadenti caratteristiche meccaniche, principal-

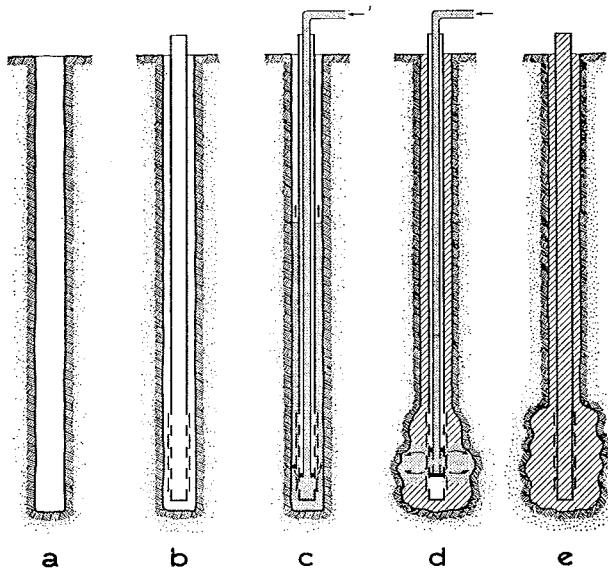


Fig. 1. - Fasi esecutive di un micropalo Tubfix.
a) perforazione; b) posa dell'armatura tubolare; c) iniezione di guaina; d) iniezioni di ancoraggio (in più riprese).

mente allo scopo di accertare l'influenza della lunghezza del tratto sbulbato sulla capacità portante (figg. 2 e 3).

In seguito ogni applicazione di importanza tale da sconsigliare un sovradimensionamento cautelativo è stata preceduta dalla esecuzione di prove di carico che, oltre a risolvere i problemi di progettazione dei singoli casi, hanno fornito un quadro generale dal quale emerge la sostanziale uniformità di comportamento in condizioni anche assai diverse.

Nelle figure 5 e 7 sono riportati i risultati di alcune prove di carico. In tutti i diagrammi è stata posta in evidenza la retta raffigurante l'accorciamento elastico della parte non sbulbata.

Le dimensioni trasversali del fusto dei micropali sono state dedotte dai volumi di malta iniettati a costituzione della « guaina »: ciò porta a valori del diametro superiori al reale solo nel caso di terreni aperti, come può dedursi dalle figure 2, 3, 6 e 7 confrontate con la fig. 5.

4. Stabilità dell'equilibrio elastico.

Merita di essere approfondita l'analisi del comportamento degli esili micropali sottoposti a carichi di diverse decine di tonnellate nei confronti della stabilità dell'equilibrio elastico. La caratteristica sforzi/deformazioni spiccatamente pseudo-elastica rilevata dalle prove di carico e l'entità delle deformazioni reversibili paragonata a quella degli accorciamenti elastici calcolati per la parte non sbulbata del micropalo, autorizzano a ritenere fissa la sezione superiore del bulbo, considerando come lunghezza del solido soggetto a carico di punta quella corrispondente al tratto non sbulbato, che ha le minime dimensioni trasversali. È poi interessante verificare la condizione limite di lunghezza infinita; se essa è soddisfatta, a maggior ragione lo sono le condizioni reali con lunghezze finite.

Il carico critico per un solido caricato assialmente e vincolato lateralmente ad un mezzo elastico è dato dall'espressione [TIMOSHENKO, GERE, 1961]:

$$P_k = \frac{\pi^2 E J}{L^2} \left(m^2 + \frac{\beta L^4}{m^2 \pi^4 E J} \right) \quad (1)$$

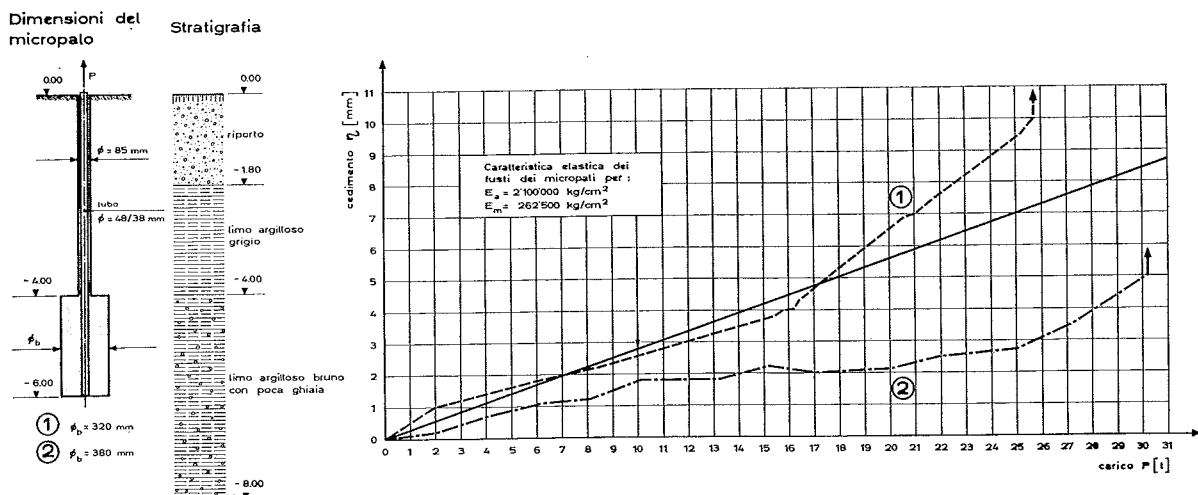


Fig. 2. - Dimensioni, stratigrafie e diagrammi di prova di due micropali a Wallisellen. (Docum. Swissboring).

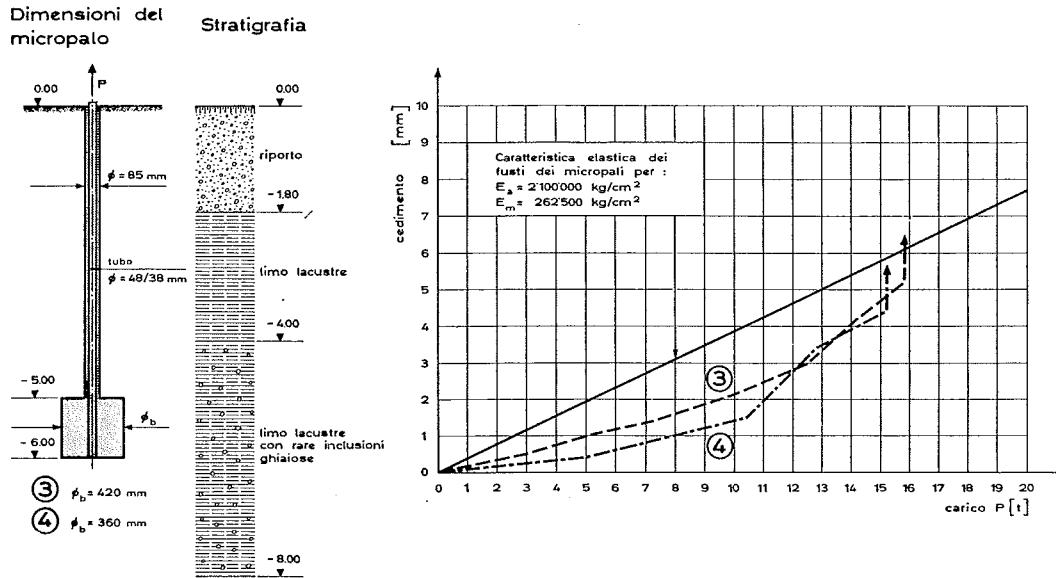


Fig. 3. - Dimensioni, stratigrafia e diagrammi di prova di due micropali a Wallisellen. (Docum. Swissboring).

dove:

- E (kg/cm²) = modulo di elasticità del materiale costituente il solido
- J (cm⁴) = momento di inerzia della sua sezione trasversale
- L (cm) = lunghezza tra le estremità, supposte vincolate a cerniera
- β (kg/cm²) = reazione del terreno per unità di spostamento laterale e per unità di lunghezza
- m (-) = numero (intero) di semionde della deformata sinusoidale causata dal carico di punta.

Per valori elevati di L , l'ipotesi di deformata a unica ansa ($m = 1$) porta a dei valori di P_k molto forti; il valore minimo P_k si avrà quindi per $m \gg 1$. Introducendo la grandezza:

$$\lambda = \frac{L}{m} \quad \text{semilunghezza d'onda}$$

la (1) diventa:

$$P_k = \pi^2 E J \left(\frac{1}{\lambda^2} + \frac{\lambda^2 \beta}{\pi^4 E J} \right) \quad (2)$$

Per ottenere il valore di P_k dalla (2) si può procedere per tentativi, introducendovi i valori di λ che si ottengono dividendo L per un numero discreto di valori interi di m e scegliendo quindi il più basso tra i valori di P_k risultanti.

È tuttavia più semplice e più eloquente consi-

derare cosa avviene della (2) al tendere all'infinito di L : λ può allora essere considerata come una variabile continua ed è lecito calcolare il minimo



Fig. 4. - Aspetto del bulbo di un micropalo eseguito a Wallisellen e successivamente estratto dal terreno. (Docum. Swissboring)

P_k ricercando il valore $\bar{\lambda}$ di λ per cui

$$\frac{dP_k}{d\lambda} = 0$$

Avendo scartato le soluzioni fisicamente non significative, si ottiene:

$$\bar{\lambda} = \pi \sqrt[4]{\frac{EJ}{\beta}} \quad (3)$$

$$\bar{P}_k = P_k(\bar{\lambda}) = 2 \sqrt{\beta EJ} \quad (4)$$

\bar{P}_k risulta ovviamente nullo per $\beta = 0$; merita di osservare che, per $\beta \neq 0$:

$$\lim_{L \rightarrow \infty} P_k = \bar{P}_k \neq 0.$$

la (2) assume l'aspetto molto semplice:

$$\mu = 0.5 \left(\frac{1}{\nu^2} + \nu^2 \right) \quad (5)$$

che è graficamente espresso dal diagramma di fig. 8.

Per risolvere i casi reali con L finito si calcoleranno dapprima \bar{P}_k e $\bar{\lambda}$ dalle (3), (4), quindi il valore di m fittizio, non intero:

$$\bar{m} = \frac{L}{\bar{\lambda}}$$

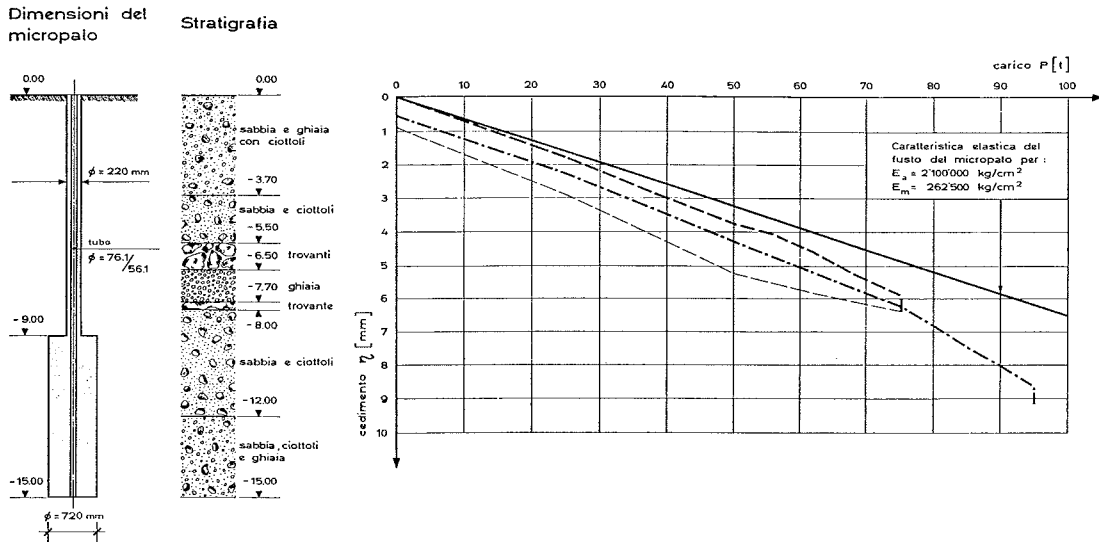


Fig. 5. - Dimensioni, stratigrafia e diagramma di prova di un micropalo eseguito a Fortezza. (Per cortese concessione dell'Autostrada del Brennero S.p.A. e dell'impresa Rizzani)

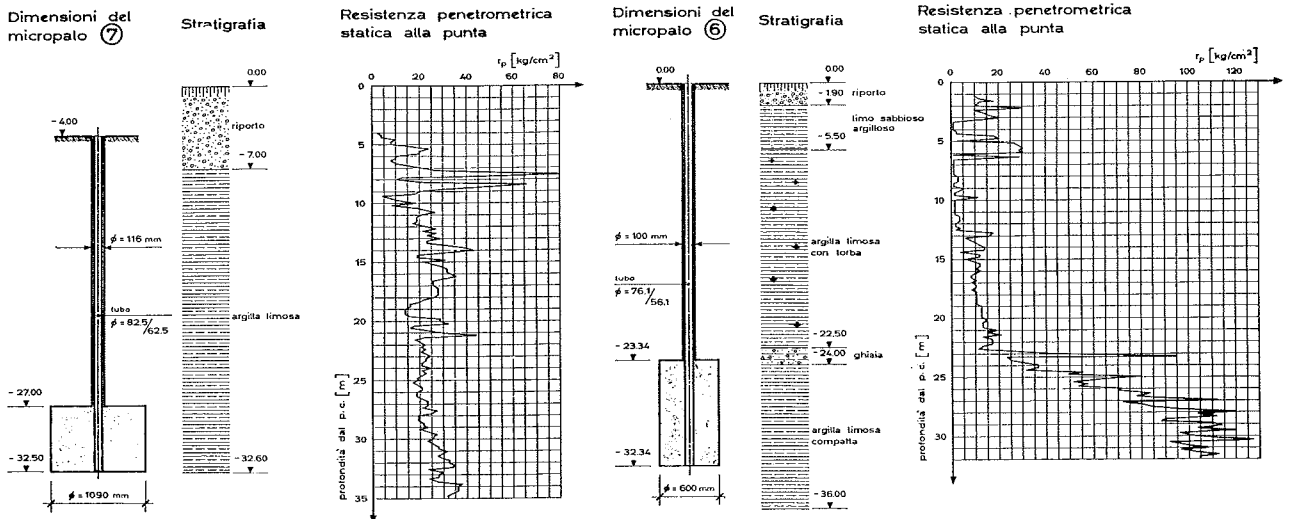


Fig. 6. - Dimensioni e stratigrafie di due micropali eseguiti a Roma, in via Leonardo da Vinci (6) ed in Largo Chigi (7). (Per cortese concessione dell'Impresa Persichetti e della Soc. Reale Mutua di Assicurazioni).

Introducendo le variabili adimensionali:

$$\mu = \frac{P_k}{\bar{P}_k} \quad \text{e} \quad \nu = \frac{\lambda}{\bar{\lambda}}$$

ed i due valori interi m_1 e m_2 più prossimi a \bar{m} e tali che:

$$m_1 < \bar{m} < m_2$$

Introdotti nella (5) i valori:

$$v_1 = \frac{\bar{m}}{m_1} = \frac{\lambda_1}{\bar{\lambda}} \quad \text{e} \quad v_2 = \frac{\bar{m}}{m_2} = \frac{\lambda_2}{\bar{\lambda}}$$

si ottengono due valori μ_1 e μ_2 tra i quali è immediato scegliere il minore, μ . Il valore cercato di P_k è allora:

$$P_k = \mu \bar{P}_k \quad \bar{P}_k \geq P_r \quad (6)$$

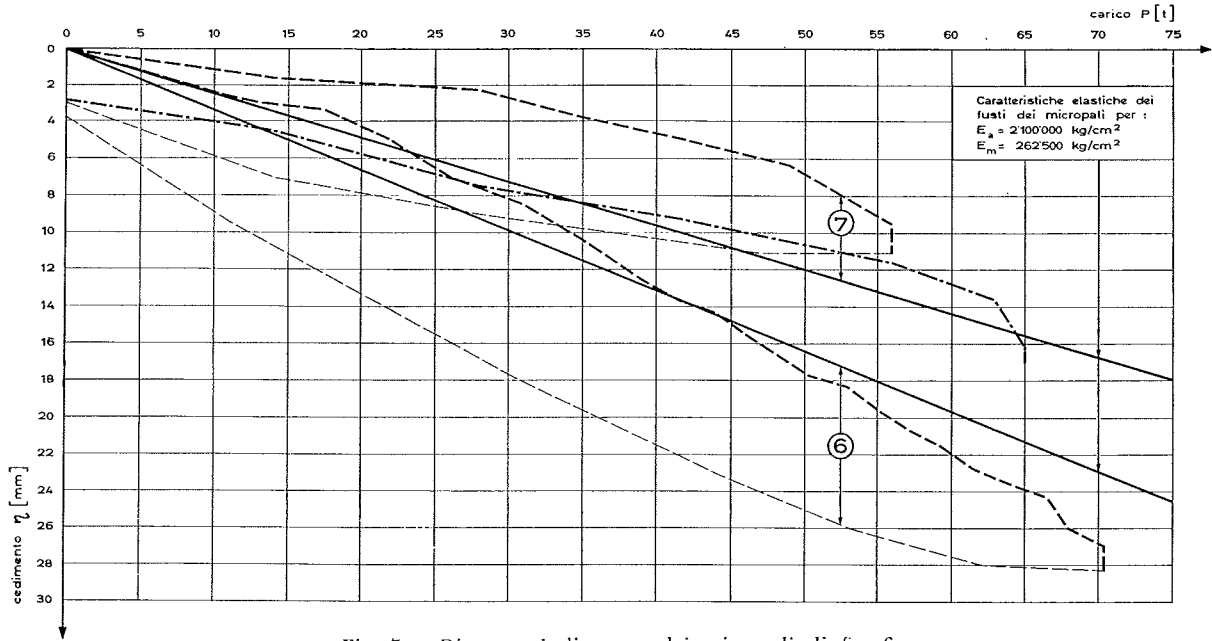


Fig. 7. - Diagrammi di prova dei micropali di fig. 6.

Questo metodo di procedere permette anche di valutare come intervenga nei confronti della stabilità dell'equilibrio la variabile L separatamente dalle altre; si può in altri termini apprezzare quanto influisca la lunghezza sulla stabilità elastica di

si deduce il limite \bar{w} del coefficiente di reazione orizzontale del terreno al di sotto del quale il grado di sicurezza nei riguardi della stabilità dell'equilibrio diviene minore di quello applicato nei confronti della rottura a compressione semplice.

È infatti:

$$\beta = w \cdot \phi$$

da cui, per la (6) e la (4):

$$\bar{w} = \frac{P_r^2}{4 \phi E J}$$

Una condizione estrema che può essere interessante verificare è quella di armatura nuda a contatto con il terreno: l'ipotesi è molto gravosa ma non da escludere tassativamente, qualora si incontrino strati di terreni spingenti che possono far rifluire la malta lungo il fusto, lasciandone sprovvisti dei tratti.

La tabella 1 riporta i valori di \bar{P}_k , P_{amm} , \bar{w} e $\bar{\lambda}$, unitamente ai valori \bar{P}'_k , \bar{w}' , $\bar{\lambda}'$ e relativi a tale seconda ipotesi.

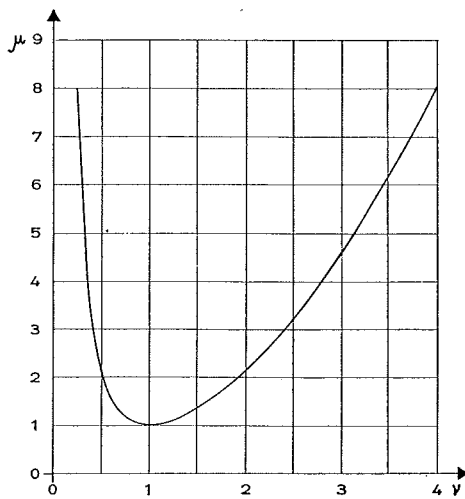


Fig. 8. - Diagramma della funzione:

$$\mu = 0,5 \left(\frac{1}{v^2} + v^2 \right)$$

TABELLA 1

| Tipo di micropalo | | Diametro del fusto \varnothing mm | Diametro armature mm | P_{amm} t | \bar{P}_k t | \bar{w} kg/cm ³ | $\bar{\lambda}$ m | P'_k t | \bar{w}' kg/cm ³ | $\bar{\lambda}'$ m |
|--------------------------|------------------|-------------------------------------|----------------------|-------------|---------------|------------------------------|-------------------|----------|-------------------------------|--------------------|
| Con armatura tubolare | Tubfix A/1 | 85 | 51,0/35,0 | 23,8 | 59,5 | 0,91 | 1,95 | 43,2 | 1,63 | 1,60 |
| | » B/1 | 100 | 60,3/44,3 | 30,7 | 76,7 | 0,69 | 2,34 | 54,2 | 1,30 | 1,92 |
| | » B/2 | 100 | 60,3/40,3 | 34,0 | 85,1 | 0,81 | 2,28 | 62,6 | 1,44 | 1,88 |
| | » B/3 | 100 | 60,3/35,3 | 37,8 | 94,4 | 0,95 | 2,21 | 71,9 | 1,75 | 1,83 |
| | » C/1 | 120 | 76,1/60,1 | 41,9 | 104,7 | 0,51 | 2,91 | 74,3 | 0,80 | 2,46 |
| | » C/2 | 120 | 76,1/56,1 | 46,5 | 116,2 | 0,59 | 2,85 | 85,8 | 0,94 | 2,43 |
| | » C/3 | 120 | 76,1/51,1 | 51,8 | 129,5 | 0,69 | 2,78 | 99,1 | 1,13 | 2,38 |
| | » D/1 | 145 | 82,5/66,5 | 53,3 | 133,2 | 0,38 | 3,46 | 83,0 | 0,69 | 2,67 |
| | » D/2 | 145 | 82,5/62,5 | 58,4 | 146,0 | 0,43 | 3,39 | 95,7 | 0,81 | 2,64 |
| | » D/3 | 145 | 82,5/57,5 | 64,3 | 160,8 | 0,50 | 3,30 | 110,6 | 0,98 | 2,60 |
| Convenzionali mono barra | \varnothing 24 | 80 | 24 | 14,7 | 36,8 | 0,76 | 1,73 | 16,3 | 8,07 | 0,64 |
| | \varnothing 30 | 100 | 30 | 23,0 | 57,6 | 0,61 | 2,16 | 25,4 | 6,46 | 0,80 |
| | \varnothing 36 | 120 | 36 | 33,1 | 82,9 | 0,51 | 2,59 | 36,6 | 5,38 | 0,96 |

Si sono prese in esame le dimensioni più correntemente impiegate per i micropali tubolari e tre ipotetici micropali convenzionali armati con una unica barra, allo scopo di istituire un confronto.

I valori riportati sono stati calcolati ipotizzando per i materiali le caratteristiche seguenti:

- malta: $E_m = 262.500$ kg/cm²
 $\sigma_{rm} = 450$ kg/cm²
- acciaio: $E_a = 2.100.000$ kg/cm²
 $\sigma_{ra} = 3.600$ kg/cm²

$$\frac{E_a}{E_m} = 8 ; \sigma_{ra} = 8 \sigma_{rm}$$

P_{amm} è ottenuto dividendo \bar{P}_k per il grado di sicurezza 2,5.

Si nota che, nella ipotesi di lavoro normale, i micropali tubolari differiscono da quelli convenzionali unicamente per i valori più elevati del carico ammissibile.

Come era logico attendersi, le conseguenze negative del verificarsi della ipotesi più gravosa sono invece molto meno sensibili per i micropali tubolari che per quelli convenzionali: mentre i primi subiscono una diminuzione di efficienza che rimane entro limiti accettabili, i secondi riescono a mantenere un grado di sicurezza appena superiore all'unità solo a condizione che il terreno abbia un coefficiente di reazione circa dieci volte maggiore di \bar{w} .

Circa i valori di \bar{w} è da notare che essi sono da porre in relazione alle condizioni particolari del problema, e cioè:

— vincolo bilaterale

— deformazioni infinitesime.

Sembra quindi lecito affermare che valori di \bar{w} inferiori a 1 kg/cm³ competano solo a terreni particolarmente scadenti, quali limi e argille limose prossimi al limite di liquidità.

È pure da notare che \bar{w} varia in ragione del quadrato di P_k ; per tale motivo al carico P_{amm} si verifica instabilità dell'equilibrio solo se:

$$w \leq \frac{\bar{w}}{6,25}$$

Infine è generalmente ammesso che w aumenti con la profondità, mentre nella precedente trattazione si è assunto come costante; la parte superiore del micropalo, cui competono i valori minori di w è per altro verso favorita dalla vicinanza dell'incastro nella sovrastruttura.

Il valore di σ_{rm} , che può apparire elevato, è correntemente raggiungibile (e superabile) impiegando malte aventi forte dosaggio di cemento, basso rapporto a/c (attorno a 0,5) e fluidificate con l'aggiunta di opportuni additivi, onde permetterne una agevole iniezione.

5. Precompressione dei micropali.

Nell'intento di fornire nuove possibilità agli interventi di sottofondazione si è messa a punto una tecnologia di precompressione per micropali destinati a sostituire nelle loro funzioni statiche fondazioni insufficienti⁽²⁾.

(2) Brev. it. n. 811.889.

Per precaricare i micropali e quindi conmetterli sotto carico alla struttura esistente, si cementa a quest'ultima un tubo coassiale a quello costituente l'armatura del micropalo; una attrezzatura composta da un martinetto e dagli organi di collegamento ai due tubi applica una compressione al

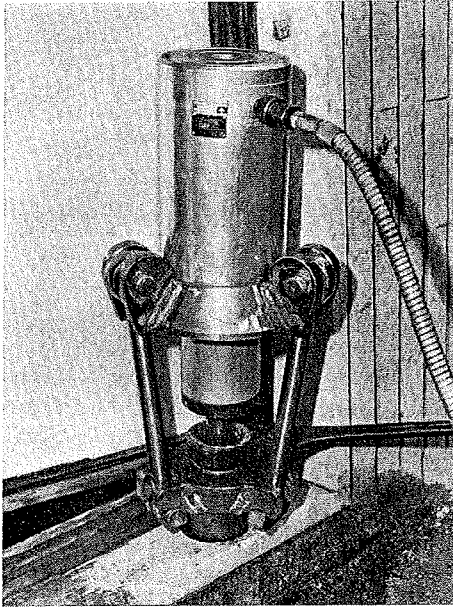


Fig. 9. - Attrezzatura di precompressione di un micropalo. (Per cortese concessione dell'Istituto per lo Studio e la Cura dei Tumori).

micropalo trovando la necessaria reazione nel tubo cementato alla struttura (fig. 9).

Lo stesso schema di principio, con dettagli costruttivi diversi, può essere applicato quando esi-

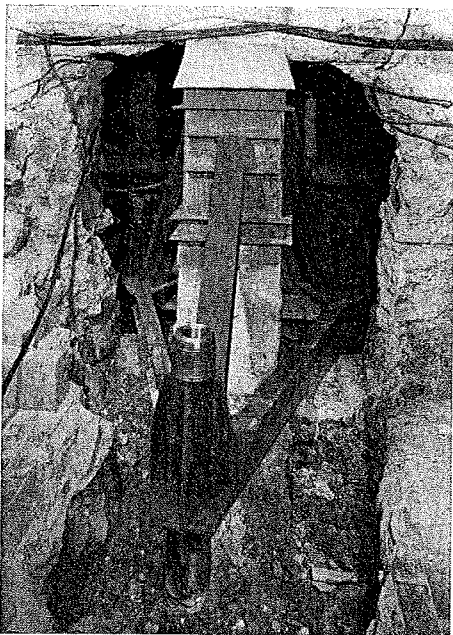
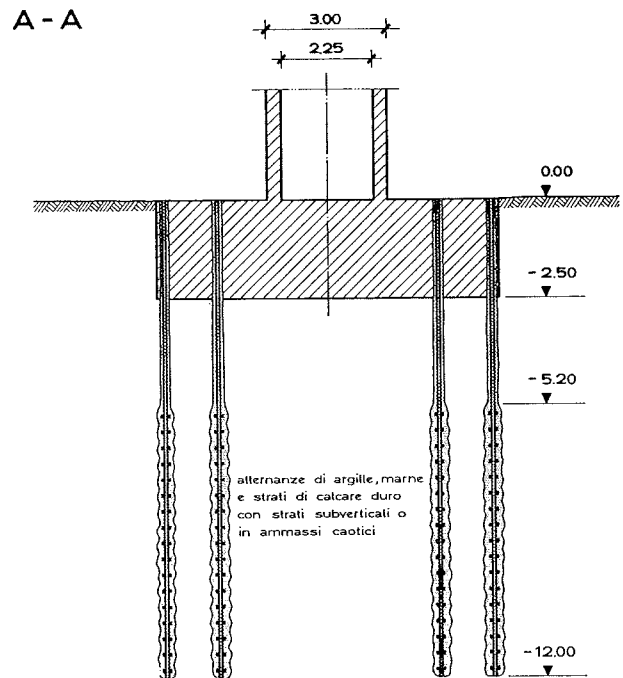


Fig. 10. - Collegamento metallico tra micropali di sottofondazione e sovrastruttura. (Per cortese concessione dello Studio Prof. A. Martinelli).

sta una struttura di collegamento (metallica o in c. a.) tra micropali e sovrastruttura (fig. 10).

Il dispositivo permette di evitare la trasmissione alla sovrastruttura dei cedimenti elastici dei pali, almeno per la parte corrispondente al carico permanente; consente di distribuire le reazioni dei micropali secondo uno schema predeterminato e non secondo gli adattamenti che la deformabilità di tutto il sistema impone; infine rende possibile imprimere una deformata voluta ad una sovrastruttura: in particolare, qualora sia stata rilevata la deformata causata da una situazione di dissesto,

Sezione verticale



Pianta

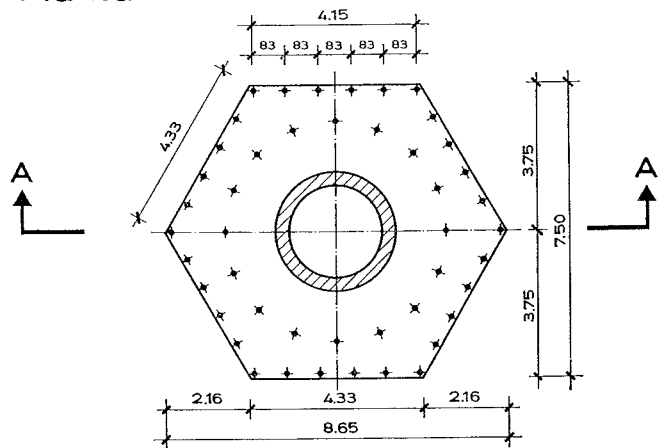


Fig. 11. - Superstrada Basentana lotti 3° e 4°. Schema della fondazione con micropali.

(Per cortese concessione dell'ANAS e dell'impresa Ing. Lodigiani).

è possibile ricondurre la sovrastruttura alla configurazione originaria.

6. Campi di applicazione.

Il notevole aumento delle capacità portanti unitarie ottenibile con i micropali tubolari nei confronti di quelli convenzionali, oltre a offrire nuove possibilità di intervento nel campo delle sottofondazioni, nel quale i micropali hanno già reso ottimi servizi, consente altresì la realizzazione di nuove fondazioni per opere di notevole impegno, quali i ponti ed i viadotti autostradali, nei casi che presentino insormontabili difficoltà esecutive per la costruzione di fondazioni profonde su pali di medio e grande diametro (fig. 11).

È infine da sottolineare la specifica attitudine dei micropali sopra descritti a risolvere i problemi di fondazione nei quali giochi un ruolo importante l'attrito negativo: in questi casi è molto vantaggioso poter disporre di elevate capacità portanti, trasmesse allo strato solido mediante un elemento che presenti ridotte dimensioni trasversali in corrispondenza dello strato in corso di assestamento.

BIBLIOGRAFIA

- CAMBEFORT H. (1964) - *Injection des sols*. Dunod, Paris.
MASCARDI C., TORNAGHI R. (1967) - *Fondazioni per la copertura delle vestigia della basilica di S. Tecla* - Atti VIII Convegno di Geotecnica.
TIMOSHENKO S. P., GERE J. M. (1961) - *Theory of elastic stability*. Mc Graw-Hill, New York.

SUMMARY

Micropiles with high bearing capacity.

A new method for the execution of micropiles is described (see figs. 1 and 4), which allows high permissible loads even in poor soils; results of load tests are given and compared with soil characteristics (figs. 2, 3, 5, 6 and 7).

The problem of safety against buckling, is then dealt with deriving from the elastic theory the formulae for the cases of infinite length and of a given finite length of micropile.

Assuming the critical load P_k (metric tons) to be equal to the failure load due to mere compression strength of pile stem, a table gives the corresponding values of the coefficient

of horizontal subgrade reaction w (kg/cu. cm) and of wave half-length (m), for micropiles of different cross dimensions and infinite length.

A method for charging underpinning micropiles before connecting them to the existing structures is shown (figs. 9 and 10).

The new techniques dealt with offer the possibility of solving difficult problems such as underpinning of damaged structures, foundation of heavily loaded highway bridge piers where ordinary piles cannot be driven (fig. 11), deep foundations where negative friction is to be expected.