

I PALI TRIVELLATI DI GRANDE DIAMETRO NELLA MODERNA TECNICA DELLE FONDAZIONI (*)

R. DIAMANTI (**)

SOMMARIO: Vengono espone le ragioni tecniche ed economiche che hanno portato in questi ultimi anni ad un sempre maggior impiego, nel campo delle fondazioni, dei pali trivellati di grande diametro.

Si descrivono i due sistemi che hanno oggi maggior applicazione e cioè il sistema a percussione e quello a rotazione con circolazione inversa. Quest'ultimo è qui maggiormente trattato, dato che il suo impiego è più recente. Si indicano sommariamente dei criteri di scelta fra i due sistemi, in funzione della natura del terreno nel quale devono essere eseguite le palificate.

1. Generalità

I pali trivellati e cioè i pali ottenuti mediante la creazione di un foro nel terreno ricavato con asportazione del materiale e riempito successivamente con un getto di calcestruzzo, hanno, da molto tempo, un largo impiego nelle fondazioni. Il campo della loro applicazione si estendeva, fino all'immediato dopo guerra, dal diametro minimo di mm 300 al diametro di mm 620. Eccezionalmente veniva usato il diametro di mm 800. Oggi invece, mediante macchinario e attrezzature di nuova concezione e di notevole potenza, la gamma dei diametri raggiunge il diametro di mm 2000 e vi è possibilità di applicazione anche per diametri fino a mm 2500.

Vantaggi dei pali trivellati di grande diametro

Ai vantaggi già conosciuti per i pali trivellati di piccolo e medio diametro se ne aggiungono, per i pali di grande diametro, altri di cui ci limitiamo ad enunciare i più importanti.

a) Possibilità di ottenere grandi portate che possono agevolmente raggiungere anche le 1000 t a palo. Ciò permette, a parità di carico sulle fondazioni, l'impiego di un minor numero di pali e di conseguenza una riduzione dei plinti sia come quantità dimensioni. Il carico permanente risulta così diminuito e anche ciò contribuisce a rendere la fondazione più economica.

b) Possibilità di attingere facilmente profondità anche intorno ai sessanta metri e più. Ciò è di particolare importanza poiché permette di poter fondare, con sicurezza ed economicità, in terreni che solo a

grandi profondità presentano buone caratteristiche portanti. La fondazione è resa possibile, anche se il terreno a forte profondità non è di natura diversa da quello superiore, poiché lo stato di compressione per carico litostatico cresce con la profondità e raggiunge valori molto forti. Il rapporto fra il carico che apporta l'opera mediante i pali ed il carico preesistente assume perciò bassi valori e tali da dare sufficiente garanzia per la stabilità della fondazione.

c) Grande resistenza alle sollecitazioni dovute a forze orizzontali.

d) Possibilità d'allargare la base del foro in modo da ottenere un vero e proprio plinto.

I vantaggi sopra esposti spiegano come, malgrado l'alto costo, i grandi diametri abbiano avuto grande diffusione e come sia crescente il loro impiego.

Mediante infatti la loro adozione il progettista può risolvere problemi di fondazioni di particolare difficoltà sia per le forti concentrazioni di carico, come nelle fondazioni dei ponti, impianti siderurgici, grattacieli, pontili ecc., che nei casi di terreni di fondazione che solo a forte profondità presentano strati di sufficiente portanza.

Particolarmente indicata è l'applicazione di pali grande diametro nelle costruzioni in zone sismiche, sia per la loro resistenza alle sollecitazioni orizzontali, sia per la loro possibilità di raggiungere facilmente grande profondità, cosa questa importante, poiché l'esperienza riconosce che coll'aumentare della profondità diminuisce, nello stesso corpo geologico, la esaltazione di superficie delle onde sismiche.

Le stesse ragioni consigliano il palo di grande diametro in zone franose. Naturalmente è necessario che lo strato del terreno coinvolto nel movimento, in atto o potenziale, sia seguito (ad una profondità non eccessiva) da uno perfettamente stabile in cui i pali vengano decisamente ammorsati. Il minor addensamento dei pali, rispetto ad una fondazione con

(*) Comunicazione presentata al VI Convegno di Geotecnica (Pisa, 9 aprile 1963).

(**) Dott. Ing. Rolando DIAMANTI, Roma.

pali di piccolo o medio diametro, facilita lo scorrimento del materiale in movimento, diminuendo così le sollecitazioni orizzontali che possono venir facilmente assorbite dalla grande sezione resistente del palo.

Il numero limitato di pali di grande diametro che fanno parte di una fondazione (p.es. i plinti dei piloni dei fabbricati di LE CORBUSIER in Marsiglia hanno un carico di 2000 t contribuito su soli 3 pali da 1,50 m di diametro con allargamento alla base di 3 m) rende reticente qualche progettista sulla loro adozione. Si temono le gravi conseguenze che potrebbero aversi se uno dei pali presentasse difetti d'esecuzione con susseguente forte diminuzione di

avere nei confronti dell'altra è sempre contenuto nell'incertezza che si ha nella determinazione delle effettive caratteristiche geotecniche del terreno e nelle variazioni di portata dovute alle modalità d'esecuzione che, oltre dal tipo di attrezzature usate, dipendono dalle capacità tecniche del personale preposto al lavoro.

Pertanto, indipendentemente dalle formule, la portata effettiva deve essere controllata sempre mediante prove di carico, anche se quest'ultima presentano, causa i forti carichi, qualche difficoltà di realizzazione.

In genere le prove dei pali danno risultati lusinghieri rispetto al previsto, specie quando il getto

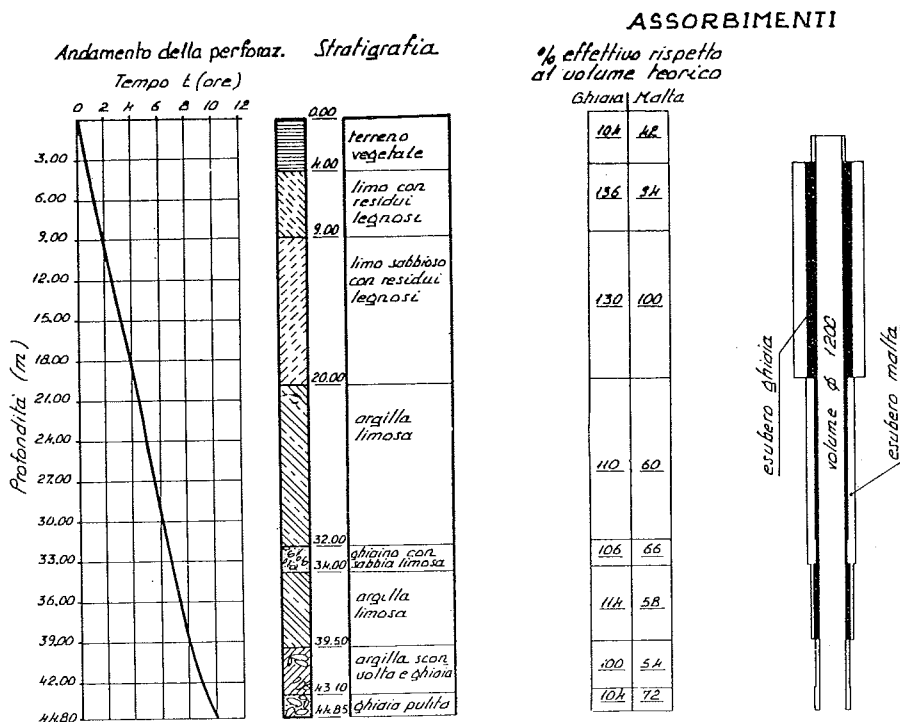


Fig. 1

portata. Questo è un pericolo possibile ma non probabile, e ciò è confortato dall'esperienza. L'esecuzione di tali pali avviene infatti mediante macchinari di alta efficienza e la loro grande produttività permette l'impiego di mano d'opera altamente specializzata e diretta da tecnici esperti anche quando si ricorre, per l'esecuzione di una palificata, all'impiego di una sola macchina. Cosa questa che non è possibile, per ragioni economiche, per le attrezzature di piccolo e medio diametro.

Determinazione della capacità portante dei pali di grande diametro

Per determinare la capacità portante dei pali, in sede di progetto, vengono usate le formule attualmente applicate per i pali trivellati di piccolo e medio diametro e precisamente: CAQUOT-KERISEL, DOERR, RANKINE ecc.

Si può usare una qualsiasi delle formule citate perché in effetti il vantaggio che l'una formula può

viene eseguito con calcestruzzo *Prepakt* e ciò per due ragioni principali:

a) Le caratteristiche geotecniche del terreno in posto sono superiori in realtà a quelle determinate in laboratorio su campioni. Quest'ultimi, benché indisturbati, sono sempre decompressi.

b) L'iniezione di malta *Prepakt* non solo satura i vuoti della ghiaia di riempimento ma, penetrando nel terreno lo consolida. Colle sue ramificazioni la malta aumenta inoltre sia la portata laterale che la resistenza alla punta del palo. Quest'ultima può assumere grandi valori se il palo è incastrato nella ghiaia, poichè in questo caso l'iniezione porta alla formazione di forti bulbi di base. L'eccedenza della malta rispetto alla quantità teorica può essere quindi messa in diretta relazione colla maggior portata risultante dal palo.

A titolo d'esempio riportiamo nelle Fig. 1-2-3 i dati di costruzione e di prova di uno dei pali \varnothing 1200 mm della palificata di fondazione della pila sinistra del

ponete sull'Aniene in Roma, facente parte delle opere per il prolungamento di Viale Libia.

Il palo è stato eseguito con macchine a rotazione a circolazione inversa. Il terreno interessato dal palo, la cui stratigrafia è indicata nella Fig. 1, è costituito da una serie di livelli aventi scarsissime caratteristiche geotecniche e da un banco di ghiaia nel quale è ammorsata la punta del palo. La forte velocità di perforazione (Fig. 1) conferma la scarsa consistenza dei terreni attraversati.

Durante l'esecuzione della perforazione si ebbero dei piccoli franamenti, specie nei livelli superiori che furono successivamente colmati dalla ghiaia di riempimento del foro. L'iniezione di malta *Prepakt* superò

2. Sistemi d'esecuzione

I pali di grande diametro si possono eseguire principalmente con macchine che lavorano a percussione o a rotazione.

Macchine a percussione

Data l'ormai grande diffusione di queste macchine ed il fatto che esse sono state già trattate dalle letterature tecniche, ci limiteremo ad un sommario cenno.

Le attrezzature per i pali trivellati di piccolo e medio diametro non possono superare il diametro

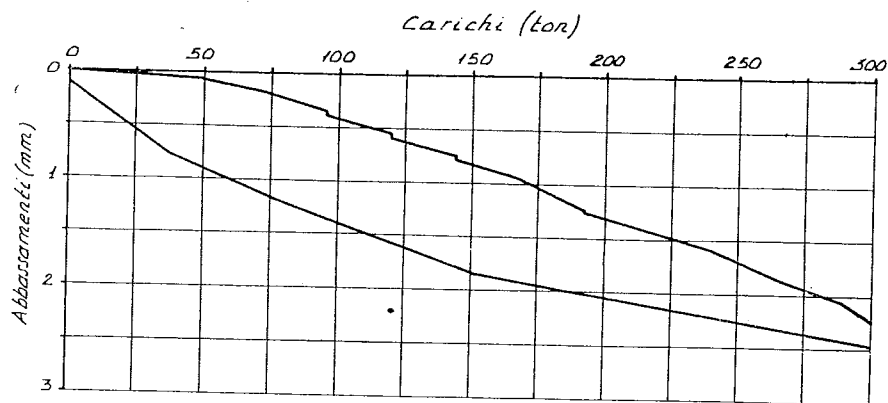


Fig. 2

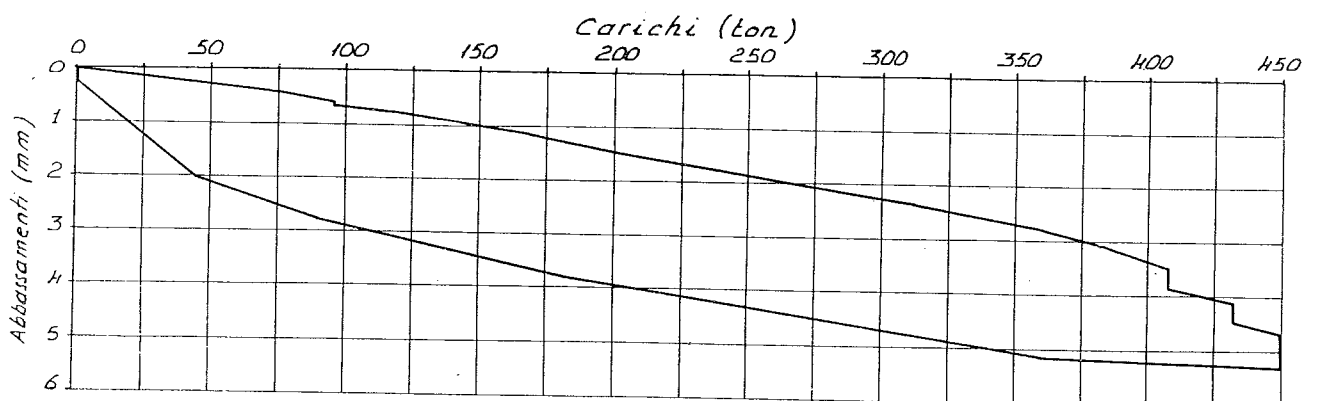


Fig. 3

il valore teorico e l'andamento dell'assorbimento lungo il fusto del palo è evidenziato nella stessa Fig. 1.

La Figura 2 e la Figura 3 mostrano il comportamento del palo sotto l'azione del carico rispettivamente di 300 t e 450 t.

Le frecce ottenute di 2,4 mm per il carico a 300 t e di 5,2 mm per il carico a 450 t, attestano le ottime qualità portanti del palo, confermate dal quasi inesistente cedimento permanente. Non è stato possibile effettuare altre prove con carico superiore alle 450 t, ma i risultati indicano chiaramente che il carico d'esercizio di 300 t è facilmente assorbito dal palo.

800 mm, poiché gli sforzi per l'infissione e l'estrazione del tubo forma raggiungono valori superiori alle loro possibilità.

Nelle macchine a percussione di grande diametro l'affondamento dei tubi forma è reso possibile dall'intervento di una macchina, detta « *tubeuse* » (1), la quale, dando un movimento alternativo intorno all'asse del tubo forma, riduce al minimo la resistenza di attrito fra tubo e terreno.

Inoltre la normale benna a valvola è sostituita

(1) Chiamata così dalla Società francese BENOTO che per prima l'applicò nell'esecuzione dei pali di grande diametro nel porto di Le Havre.

da un attrezzo il cui principio è quello di una benna mordente. Inizialmente le due macchine, quella che comanda la benna e la tubeuse, erano separate.

Oggi si costruiscono macchine che hanno incorporata la tubeuse e nelle quali sia l'affondamento che l'estrazione del tubo forma sono facilitati anche dalla azione di martinetti verticali.

La produttività di queste macchine dipende, a parità di altre condizioni, dalla lunghezza degli elementi di tubo forma e dal loro collegamento.

Non potendo per ragioni di deformabilità e di manovra ricorrere alla filettatura, si è ripiegato, fin dalla prima applicazione, sulla saldatura. Sia questa operazione che l'inversa, cioè il taglio colla fiamma necessario in fase d'estrazione della colonna, comportano un notevole perditempo. Si sono cercate pertanto, in questi ultimi anni, altre soluzioni. Oggi ci sono macchine che lavorano con tubazioni, il cui diametro massimo è però di \varnothing 1200 mm, i cui elementi, aventi una lunghezza intorno a 5 m, sono collegati fra di loro mediante bulloni. Naturalmente questi ultimi devono essere contenuti, per non creare pericolosi attriti, sia col terreno che col calcestruzzo, nel corpo del tubo forma, che assume perciò spessore adeguato o viene eseguito in doppia fodera.

Il getto del palo può avvenire sia riempiendo il foro con calcestruzzo normale sia usando il calcestruzzo ottenuto col sistema *Prepaekt*.

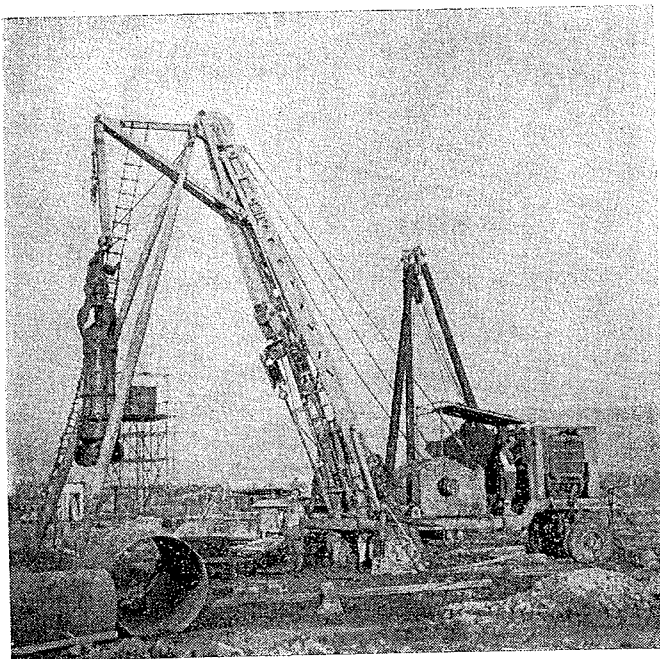


Fig. 4 - Macchina a percussione.

Macchine a rotazione

Sono di più recente applicazione ed il loro impiego si sta rapidamente diffondendo.

Tratteremo solo delle macchine a circolazione inversa poiché sono quelle più diffuse in questo campo.

La circolazione inversa, e cioè la realizzazione di una corrente ascendente a forte velocità nell'asta di

rotazione durante il lavoro dell'utensile rotativo, permette il trasporto del materiale disgregato. Non è necessario che quest'ultimo sia ridotto alle minime dimensioni poiché, data la forte velocità della corrente ascendente, si possono trasportare elementi che in certe macchine possono raggiungere il diametro di 300 mm. Lo scarico avviene in un vascone, sul cui fondo depositano le materie solide, mentre il fluido, che diventa in breve tempo un vero e proprio fango di circolazione, ritorna in ciclo.

In questo procedimento non si effettua il rivestimento del foro poiché la colonna di fluido contribuisce alla sua stabilità.

Al termine della trivellazione si può facilmente eseguire, come nelle macchine a percussione, un allargamento della base, sia agendo con speciali utensili alesatori sia procedendo ad opportuni spostamenti della macchina.

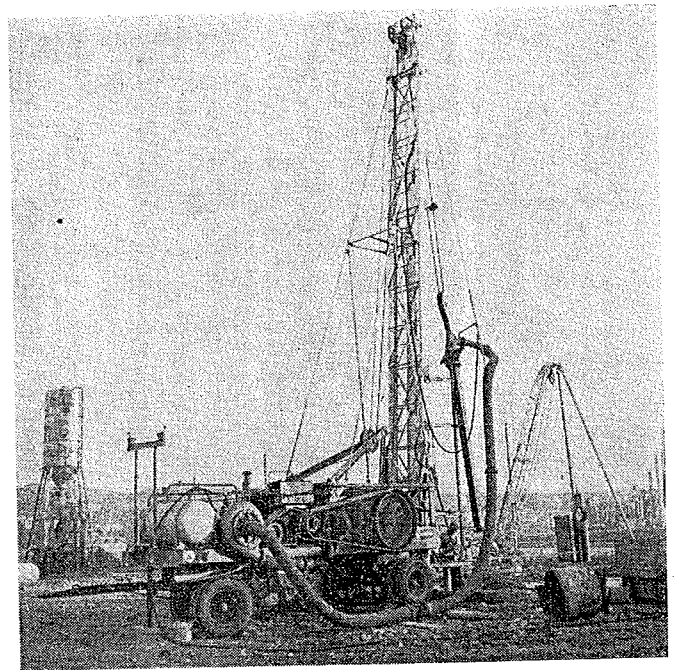


Fig. 5 - Macchine a rotazione.

È facile comprendere come sia possibile a tali macchine, per le notevoli dimensioni del materiale trasportato e per la mancanza di un rivestimento del foro, ottenere alte velocità di perforazione e raggiungere facilmente, anche con grandissimi diametri, forti profondità.

Il pumping effect o effetto di erogazione può essere realizzato, nelle macchine a circolazione inversa, in tre modi:

a) Mediante l'impiego di pompa a ghiaia, che aspira direttamente dalla sommità dell'asta di rotazione. In questo caso l'effetti di erogazione può assumere in pratica al massimo un valore di $0,6 \div 0,7$ atm.

b) Mediante un iniettore che immettendo nell'asta di rotazione acqua e forte pressione, provoca un effetto di erogazione che va da $1,2 \div 1,8$ atm.

c) Mediante immissione di aria a pressione alla base della colonna delle aste di rotazione. L'acqua di circolazione assume pertanto un minor peso specifico per cui si ha un notevole effetto ascensionale. Inoltre la massa d'aria immessa sotto pressione danno un effetto dinamico verso l'alto. In totale si ha un effetto dinamico verso l'alto. In totale si ha un effetto di erogazione che può raggiungere anche le 3 atm.

Le più usate sono le macchine con pompa a ghiaia.

A queste seguono quelle con immissione d'aria compressa. L'iniezione d'acqua a forte pressione non ha pratica utilizzazione nel campo delle macchine per fondazioni ed ha un impiego limitato nell'esecuzione di pozzi.

Negli strati molto sciolti come sabbia e ghiaia, qualche piccolo franamento si può avere o durante la manovra della colonna delle aste di rotazione o quando, durante una sospensione di lavoro, oltre ad avere una chiarificazione dell'acqua che riempie il foro per decantazione delle sostanze in sospensione, si ha un abbassamento del suo livello per perdite nel terreno.

Questi franamenti, che sono sempre molti limitati, impongono quando si presentano una particolare tecnica nell'esecuzione del getto del palo, come andremo a vedere.

Getto dei pali

Il riempimento con calcestruzzo dei fori ottenuti dalla rotazione sia con circolazione diretta che inversa deve seguire procedimenti diversi secondo la natura dei terreni attraversati che condiziona la stabilità del foro.

Nei terreni che danno garanzia di stabilità il getto può avvenire sia con calcestruzzo immesso nel fondo del foro mediante tubazione impedendo così il dilavamento, che con riempimento del foro con ghiaia e successiva iniezione di malta *Prepakt*. Il getto, sia che avvenga con un sistema che con l'altro, deve essere preceduto da un energico lavaggio che porti alla chiarificazione delle acque di circolazione ed alla eliminazione degli eventuali depositi di fanghi decantati durante la sosta tra la fine della perforazione e l'inizio delle operazioni di getto.

Nei terreni che presentano livelli di sabbia o ghiaia sciolti è consigliabile, una volta eseguita l'operazione di trivellazione, procedere all'introduzione di un tubo avente diametro esterno leggermente inferiore a quello del foro. Questa operazione deve avvenire prima di procedere al lavaggio che, pertanto alla chiarificazione delle acque, può determinare qualche piccolo franamento facilmente contenuto dalla tubazione di rivestimento.

In questi casi è preferibile eseguire il getto del palo impiegando solamente il calcestruzzo *Prepakt* poiché l'iniezione di malta oltre ad interessare la sezione del palo va a riempire i vuoti lasciati dagli eventuali piccoli franamenti e consolida i livelli di sabbia e ghiaia contribuendo così notevolmente all'aumento di portata del palo. La colonna di rivestimento viene sollevata a mano a mano che si procede col

riempimento della ghiaia. Quest'ultima deve avere, secondo la nostra esperienza, una granulometria diversa da quella usata per i getti di calcestruzzo usuali di *Prepakt*. In questo si richiede, per ottenere valori alti nella resistenza dei calcestruzzi e per ragioni di economia, una granulometria continua che ha come diametro del minimo elemento il valore di 15 mm.

Per la realizzazione del calcestruzzo *Prepakt* nei pali è opportuno invece che la ghiaia sia formata da grossi elementi con un diametro non inferiore a 50 mm facendo molta attenzione all'assenza di sabbia e di elementi sottili. I calcestruzzi che ne risultano raggiungono ugualmente buone caratteristiche meccaniche e si ha il vantaggio di non spingere al massimo la chiarificazione delle acque poiché la malta d'iniezione trovando meno resistenza all'avanzamento sposta facilmente, per differenza di peso specifico, l'acqua sovrastante che non essendo completamente chiarificata contribuisce alla stabilità del foro.

In questo caso è necessario che l'iniezione della malta sia protratta in modo da essere sicuri dell'aver eliminato, dalla zona del palo utile, ogni impurità dipendente dalle acque fangose.

3. Criteri di scelta per l'impiego delle macchine a percussione e rotazione

Prima dell'esecuzione di una palificata, costituita da pali di grande diametro, ci si domanda, avendo a disposizione sia macchine a percussione che macchine a rotazione, quale tipo sia da impiegare. La risposta a questo interrogativo viene in genere data dalla natura del terreno e dalle caratteristiche della palificata ed è naturalmente il parametro economico che determina la scelta.

E' utile pertanto esporre brevemente i vantaggi dell'uno e dell'altro tipo.

Macchine a percussione

Sono macchine universali, vanno bene perciò per qualsiasi terreno. La loro produttività però è limitata, nella maggior parte dei casi, dalla necessità d'intubare il foro e decresce coll'aumentare della profondità, causa il sempre maggior percorso della benna.

Il rivestimento del foro non permette di superare il diametro di 1500 mm e una profondità di 50 m.

In terreni facili le macchine più perfezionate possono eseguire in un giorno circa 20 m di palo di diametro 1100 mm.

Macchine a rotazione

Sono macchine particolarmente indicate per i terreni di carattere argilloso. Il loro impiego nei terreni con livelli di ghiaia e sabbia può essere limitato dalla grandezza della ghiaia. Se questa supera le dimensioni del diametro interno dell'asta o presenta grossi ciotoli, l'impiego della macchina è impedito.

Risulta anche difficoltoso, per gli intasamenti che si possono verificare, l'esercizio di queste macchine

quando le dimensioni della ghiaia si avvicinano a quelle del diametro interno dell'asta.

Sempre nei terreni con livelli di ghiaia, si possono presentare delle difficoltà quando si deve lavorare in assenza di falda acquifera.

Ciò può comportare assorbimenti notevoli dell'acqua di circolazione, il che richiede una portata d'acqua non sempre reperibile. In questo caso si può ricorrere ai fanghi bentonitici, ma l'eventuale loro forte assor-

bimento può rendere meno economico l'esercizio con tali macchine.

In compenso la produttività di dette macchine a rotazione può raggiungere nei terreni idonei valori molto alti (si sono eseguiti pali \varnothing 1300 mm — lunghi 45 m — in 20 ore lavorative) e non vi sono limiti né di profondità né di diametro in quanto si potrebbe raggiungere facilmente profondità anche intorno agli 80 m e superare il diametro di 2000 mm.

LES PIEUX DE GRAND DIAMÈTRE DANS LA MODERNE TECHNIQUE DES FONDATIONS

Sommaire: On va exposer ici les raisons techniques et économiques qui ont porté, au cours de ces dernières années, vers un emploi de plus en plus grand des pieux forés de grand diamètre dans le domaine des fondations.

On rend compte des deux méthodes qu'on applique à l'heure actuelle: la méthode à percussion et la méthode à rotation avec injection indirecte. Celui-ci est plus traité, parce qu'il est de plus récente application.

On indique sommairement des jugements de choix entre les deux systèmes, en fonction de la nature du terrain dans lequel doit être exécuté le pilotage.

LARGE DIAMETER PILES IN MODERN FOUNDATION ENGINEERING

Summary: The article describes the technical and economic reasons which in the last few years brought to a greater use of the bored piles of large diameter in the realm of foundation works.

The article mentions the two methods which are at present more employed; that is the percussion method and the reverse circulation method. The latter is dealt with in greater detail for it is more recent.

Some criteria of choice between the two methods are mentioned; they depend on the nature of the soil in which the piling must be carried out.