

## ASPETTI TECNOLOGICI ESECUTIVI DELLE FONDAZIONI DELLA PILA N° 27 DEL VIADOTTO SULL'ARNO - NUOVA DIRETTISSIMA FIRENZE-ROMA

ING. ALDO BELLINI

Ufficio Studi e Progetti della Presspali S.p.A. - Milano

ING. PATRIZIA POLENGHI

Ufficio Studi e Progetti della Presspali S.p.A. - Milano

**Sommario:** Dopo un inquadramento della zona di attraversamento dell'Arno con la Nuova Direttissima FIRENZE-ROMA, si descrivono le problematiche di carattere esecutivo affrontate durante la realizzazione delle fondazioni della pila centrale n. 27.

Per ragioni idrauliche il plinto della pila doveva essere costruito interamente sotto l'alveo del fiume, per cui i lavori sono stati eseguiti da pontoni galleggianti e per operare lo scavo del terreno ed eseguire i micropali che riportano i carichi in profondità, si è dovuta costituire una tura circolare con modalità tecniche del tutto singolari rese possibili dall'impiego di gravel-grouting e di una palancolata metallica.

### Generalità:

Nel quadro di ammodernamento e sviluppo dell'Ente Ferrovie dello Stato, è in fase di ultimazione la Nuova Direttissima Firenze-Roma, che permetterà velocità di esercizio dell'ordine di 250 km/h.

Un gruppo di Imprese di costruzioni, riunite nel Consorzio FE.S.P.I., Ferrovie dello Stato -Programma Integrativo, stanno ultimando infatti la tratta Arezzo Sud - Figline Valdarno, della lunghezza di circa 44 Km. La tratta è caratterizzata da una morfologia del terreno assai varia, che ha imposto la realizzazione di numerose opere di ingegneria, quali gallerie a semplice o doppio binario, gallerie artificiali, opere d'arte di vario tipo e numerosi viadotti.

Per le fondazioni dei viadotti sono stati adottati in generale pali a grande diametro ( $\varnothing$  1000-1200 mm); fa eccezione l'attraversamento del fiume Arno, per il quale sono state invece adottate fondazioni del tipo "a pozzo" realizzate con metodologie e tecniche basate sulla gettiniezione (jet-grouting e gravel-grouting), sull'impiego di micropali e avvalendosi di una caratteristica particolare, specie per la pila al centro del corso d'acqua, oggetto della presente memoria tecnica.

### Fondazioni del Ponte sull'Arno:

Il viadotto ferroviario della lunghezza di circa 1.7 Km, attraversa l'Arno ad un'altezza media di 50 m in zona caratterizzata da un andamento a meandri, con il livello dell'acqua regolato dallo sbarramento formante il bacino di "La Penna" e con una larghezza fra le sponde di circa 150 m.

Il ponte è costituito da un telaio a 4 campate, di cui le laterali con luci di 45 m e le due centrali con luci di 70 m.

Per la realizzazione delle due pile in sponda sinistra e in sponda destra (pile n. 26 e 28) sono state adottate delle fondazioni del tipo "a pozzo", precisamente:

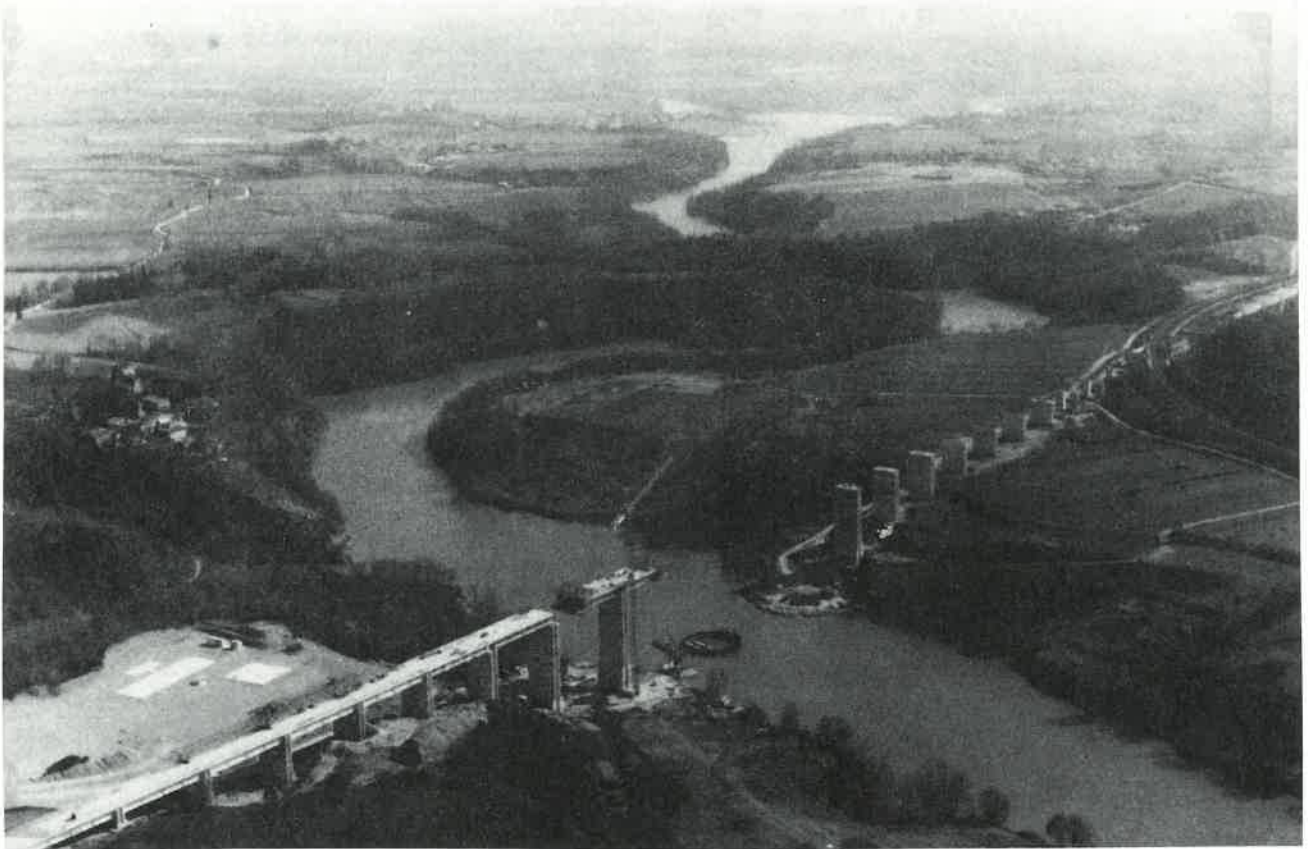
- per la n. 26: realizzazione di una tura parziale lato fiume con "gravel-grouting", successivo completamento della stessa con micropali accostati ed, infine, micropali di cucitura tra tampone di fondo gradonato e roccia di appoggio.
- per la n. 28: esecuzione di una tura circolare stagna formata da micropali accostati,  $\varnothing$  220 mm, e micropali di cucitura tra tampone di fondo e roccia di appoggio.

La pila centrale n. 27 invece è stata realizzata con metodologie e tecniche imposte dalla posizione della pila e dalla particolare natura del terreno in alveo, che verranno qui in dettaglio descritte.



Fig. 1 Il tracciato della DIRETTISSIMA FIRENZE-ROMA nella zona di Arezzo; nel dettaglio l'attraversamento dell'Arno.

Fig. 2 Veduta panoramica del viadotto di attraversamento del fiume Arno durante i lavori; si noti la tura in costruzione al centro del corso d'acqua.



### Inquadramento geologico-geotecnico:

Per quanto riguarda l'inquadramento geologico-geotecnico della zona del ponte, si incontra:

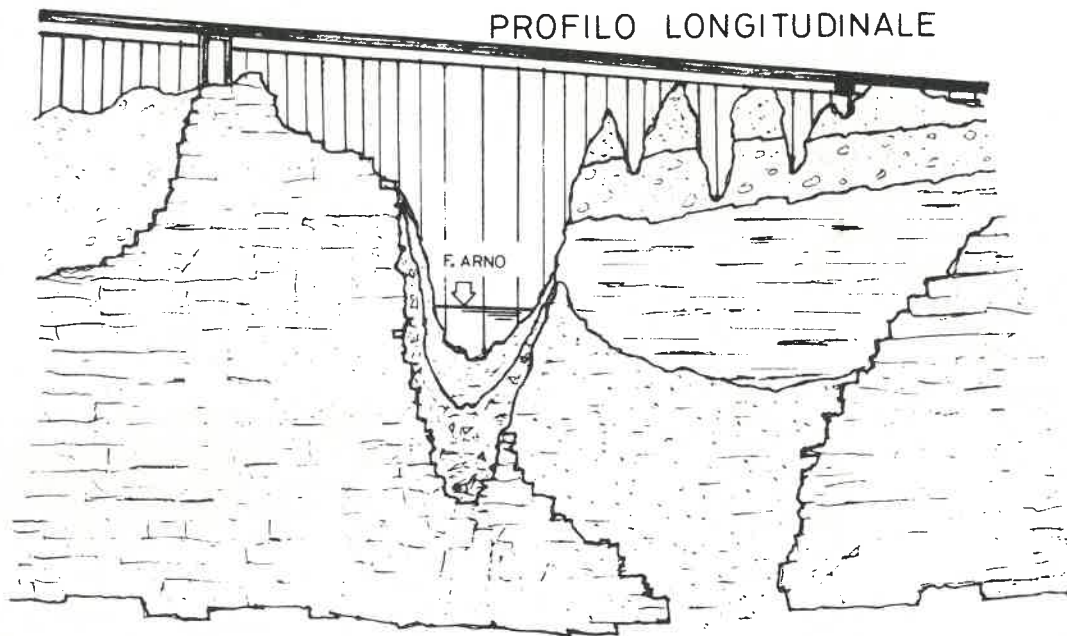
- sulla sponda sinistra affioramenti di arenarie, marne ed argille marnose - "Macigno" (zona in cui si sono adottate fondazioni dirette);
- sulla sponda opposta successioni di sabbie limose e limi sabbiosi, cui subentrano ghiaie medio-grosse con sabbia ed infine argille limose e limi argillosi grigio azzurri consistenti (zona con fondazioni del viadotto su pali).

Per la pila n° 27, la più alta e pressochè centrale rispetto alle sponde, si può fornire la seguente successione riferita alla quota di max invaso (+204.00 msl):

- acqua dal pelo libero al fondo del bacino per una profondità max di 8m, variabile a seguito di manovre delle paratoie di scarico dello sbarramento di "La Penna";

- da -8m a -12 m limo inconsistente saturo, non campionabile con presenza di residui vegetali;
- da -12m a -17m sabbie fini limose;
- da -17m a -19m sabbie medie con ghiaietto;
- da -19m a -23m arenarie molto fratturate con intercalazioni limose e sabbiose;
- oltre i 23m arenarie anche fratturate con alternanze di marne e argille marnose ("Macigno").

La descrizione stratigrafica è stata redatta cogliendo una visione di insieme da una serie di sondaggi che hanno denunciato una forte disomogeneità della formazione rocciosa di fondo (arenarie marnose) sia in senso verticale che orizzontale. Tale situazione verificata successivamente durante la fase di scavo, ha suggerito, soltanto per la pila n° 27, l'adozione di fondazioni profonde su "micropali" del  $\varnothing$  300 mm, atti a riportare i carichi ben addentro nella formazione di base rocciosa e tali da costituire una cucitura tra il tampone di fondo e la roccia di appoggio.



### LEGENDA



Limo inconsistente saturo d'acqua con residui vegetali



Limi, sabbie, ghiaie e frammenti di marne, arenarie ed argille marnose



Sabbie limose e limi sabbiosi



Ghiaie medio-grosse con sabbie



Argille limose e limi argillosi con lenti di sabbia



Limi argillosi e sabbie



Arenarie, marne ed argille marnose (Macigno)

Fig. 3 Geologia della sezione valliva in corrispondenza del PONTE ARNO (da pubblicazione FE.S.P.I.); nel testo la stratigrafia in corrispondenza della pila n° 27.

### Il problema:

L'attraversamento del fiume Arno, in corrispondenza del bacino dello sbarramento di "La Penna", ha richiesto un particolare impegno esecutivo, specie per la pila n° 27, al centro fiume.

Infatti, per raggiungere il piano di appoggio, il plinto della pila centrale doveva essere realizzato completamente al di sotto del fondo alveo, ponendo problemi di natura idraulica, per cui per raggiungere il piano di appoggio in roccia, si è ricorsi alla realizzazione di una tura eseguita da pontoni.

Precisamente, per la pila centrale più problematica anche da un punto di vista cantieristico, si sono svolte le fasi di lavoro qui descritte ed illustrate a lato:

a) consolidamento dei limi saturi e delle sabbie fini, onde creare un basamento anulare di appoggio per la successiva tura in palancole.

Il consolidamento è stato ottenuto con il sistema "gravel-grouting" che consiste nella gettiniezione del terreno con contemporanea aggiunta di ghiaia. Si ottiene così un conglomerato artificiale impermeabile e di buone caratteristiche meccaniche.

L'anello è stato eseguito dal basso verso l'alto, immediatamente al di sopra della formazione di arenarie marnose, destinata all'appoggio delle fondazioni della pila.

b) Infissione di una palancole circolare, sempre operando da pontoni e successivo completamento sui due fianchi della stessa, del trattamento in "gravel-grouting", fino ad un'altezza tale da costituire un efficace incastro di base.

c) Messa in opera della prima centinatura, abbassamento del livello interno dell'acqua e scavo a cielo aperto. Contemporaneamente si sono messe in opera, secondo le esigenze statiche, le centinature successive.

d) Una volta raggiunto il fondo scavo roccioso, getto del tampono di fondo in calcestruzzo a basso tenore di cemento, destinato all'appoggio del plinto di base della pila.

e) Esecuzione di micropali del  $\varnothing$  300 mm, allo scopo di solidarizzare il tampono in calcestruzzo con la roccia di fondo e di lunghezza e inclinazione tale da trasferire e diffondere in profondità i carichi gravanti.

I micropali sono contemporaneamente serviti a "cucire" gli strati della formazione arenaceo-marnosa di base, che pur avendo buone capacità portanti, si presentava, in taluni casi, fessurata.

f) Getto della fondazione di base della pila e successivi lavori di elevazione in condizioni cantieristiche a cielo aperto.

Quanto qui è stato sinteticamente esposto ha comportato una successione di lavorazioni e di sequenze di fasi di lavoro di delicata attuazione. Le difficoltà presentatesi sono state superate oltre che grazie alla particolare organizzazione di cantiere sviluppata per l'esecuzione dei lavori da pontoni anche grazie all'adattamento al caso specifico di parecchie macchine operatrici ed attrezzature.

In particolare per realizzare le fondazioni si sono impiegati i seguenti gruppi operativi:

- per la tura in palancole: gru Link Belt 108 e vibromartello idraulico della potenza di 90 KW, che agivano da pontone flottante delle dimensioni di 20 x 8 mq;
- per la realizzazione del "gravel-grouting": n° 2 attrezzature Kelly Presspali -KJ con pompe jetting della potenza di 380 KW, posizionate contrapposte su di un pontone flottante di 20 x 8 mq; pontoni per macchine di servizio e per i materiali;
- per la realizzazione dei micropali diam. 300 mm: attrezzatura Kelly Presspali KC e martello DTH Mission con bit da 12 1/4", azionato da due compressori Atlas Copco (2 x 21.000 l/min. alla pressione di 10.5 bar); pompa per calcestruzzo ad alta pressione per l'iniezione delle malte cementizie.

Nelle illustrazioni abbiamo rappresentato le principali fasi delle opere di fondazione, in modo da fornire gli elementi essenziali anche da un punto di vista geometrico concretizzandoli visivamente.

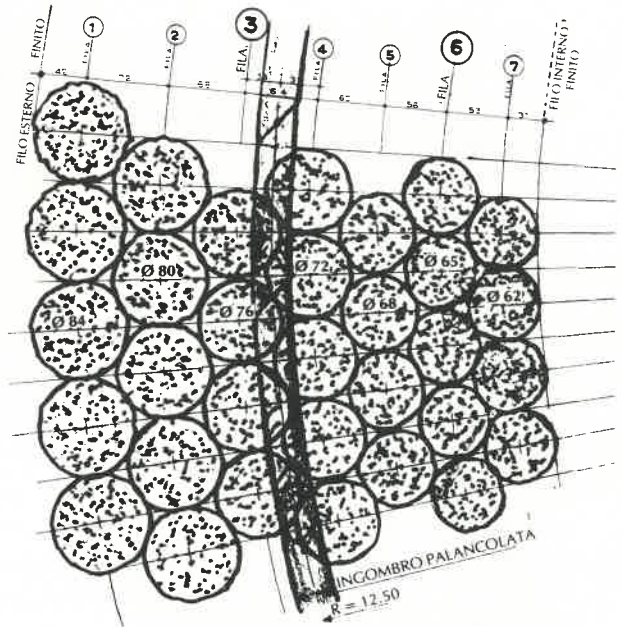
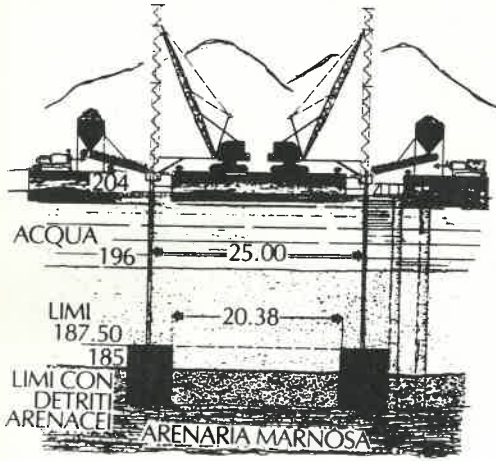


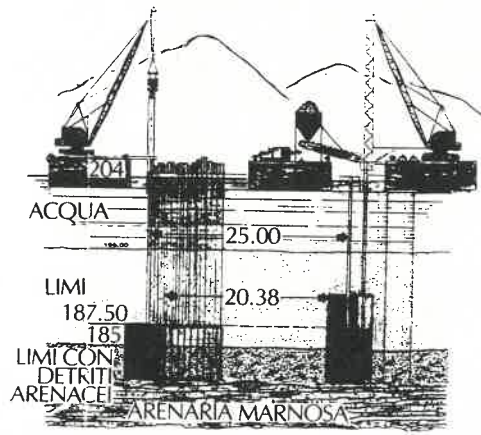
Fig. 4 Disposizione planimetrica della tura eseguita con "gravel-grouting".

TAV. 1- LE PRINCIPALI FASI DI LAVORO PER LE FONDAZIONI DELLA PILA N° 27

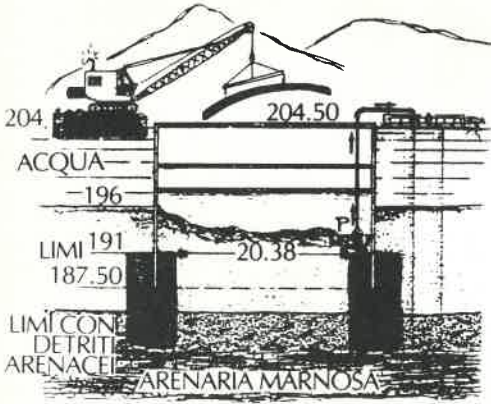
FASE A



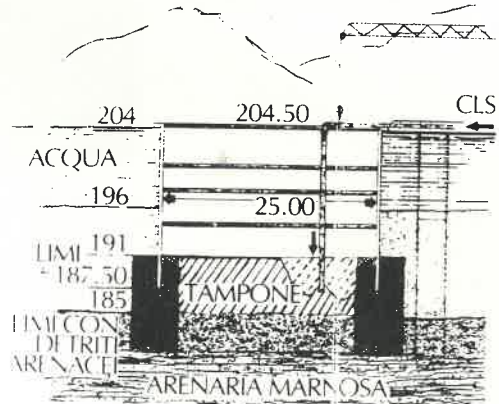
FASE B



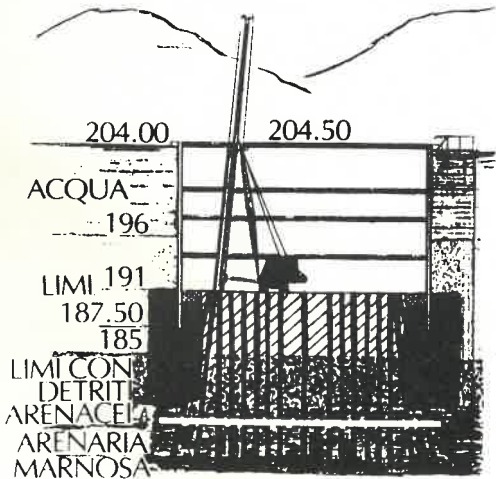
FASE C



FASE D



FASE E



FASE F

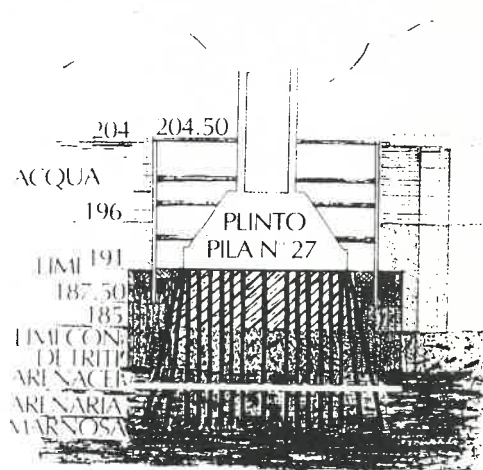




Fig. 5 Veduta del cantiere in centro fiume durante il consolidamento del fondale limoso (gravel-grouting).

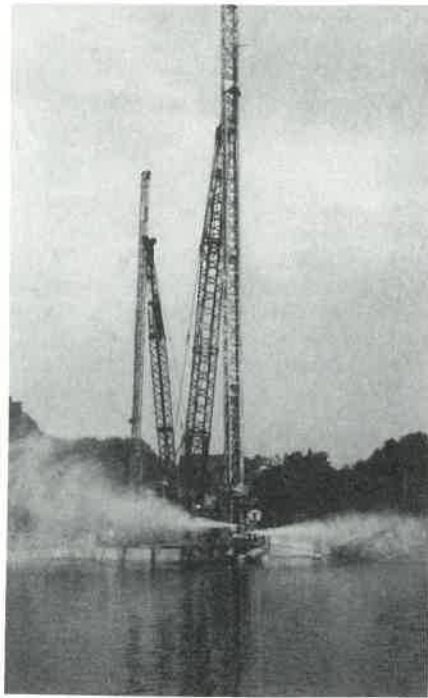


Fig. 6 Attrezzature di perforazione durante la fase di lavaggio delle batterie e degli ugelli.



Fig. 7 Infissione delle palancole a formazione della tura circolare; si noti la guida galleggiante per il posizionamento delle palancole.

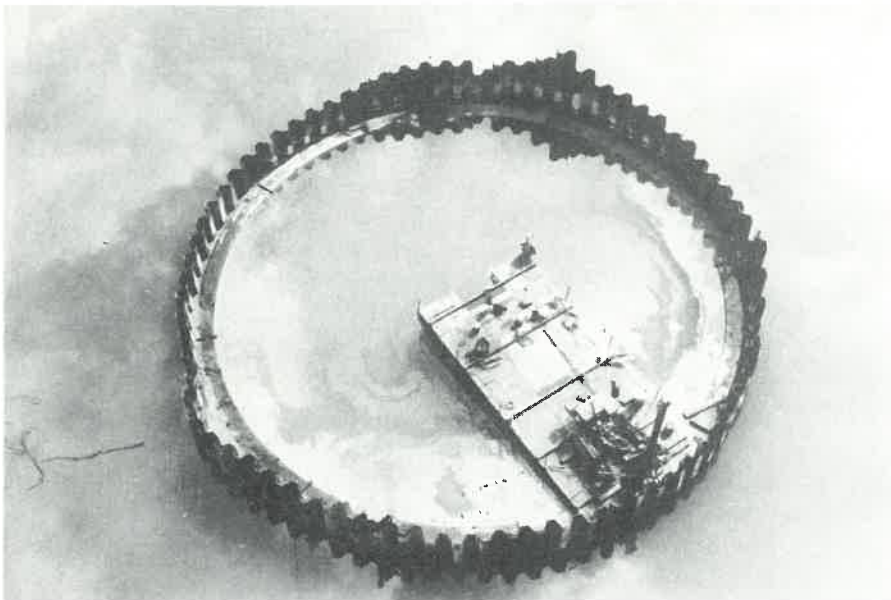
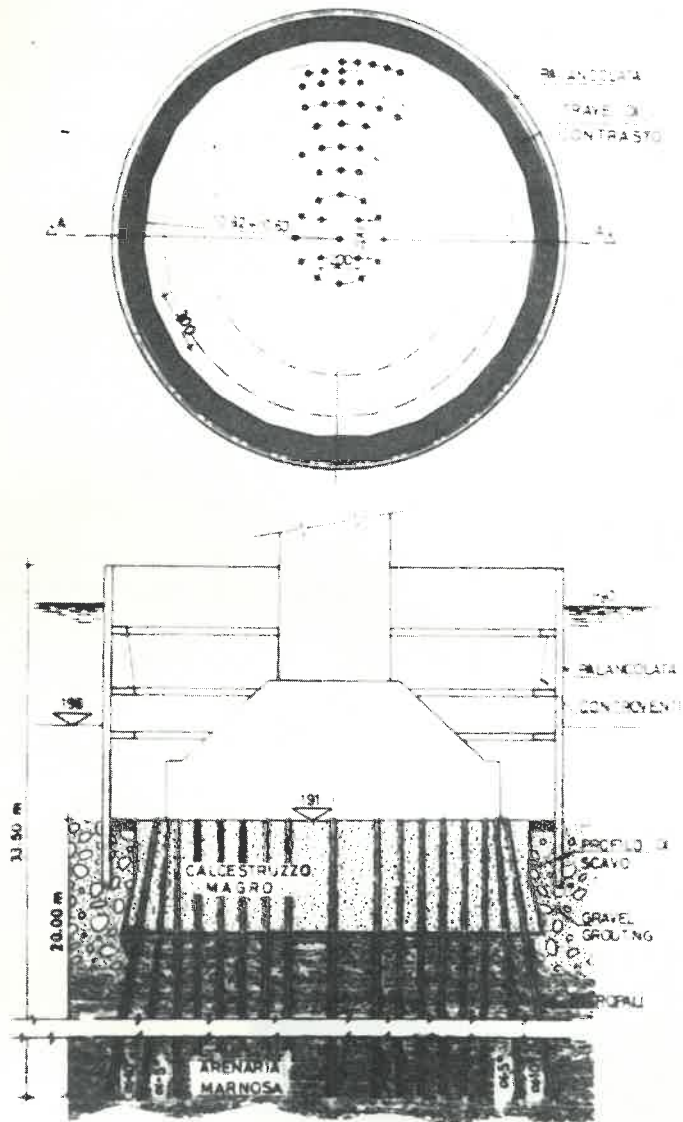


Fig. 8 "Gravel-grouting" eseguito da pontone alla base della palancole circolare.



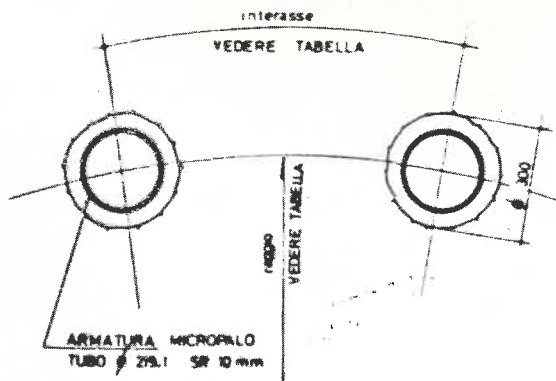
TAV. 2

PIANTA E SEZIONE SCHEMATICHE DELLA PILA N° 27

TABELLA POSIZIONE MICROPALI

r(m)	(m)	angolo gradi	n° micr.
9.40	0.858	10	66
8.85	0.926	5	66
8.30	1.022	-	9
7.20	1.077	-	42
6.00	1.420	-	33
4.80	1.990	-	26
3.80	1.990	-	18
2.40	1.792	-	12
-	-	-	9

TOTALE n° 317 MICROPALI



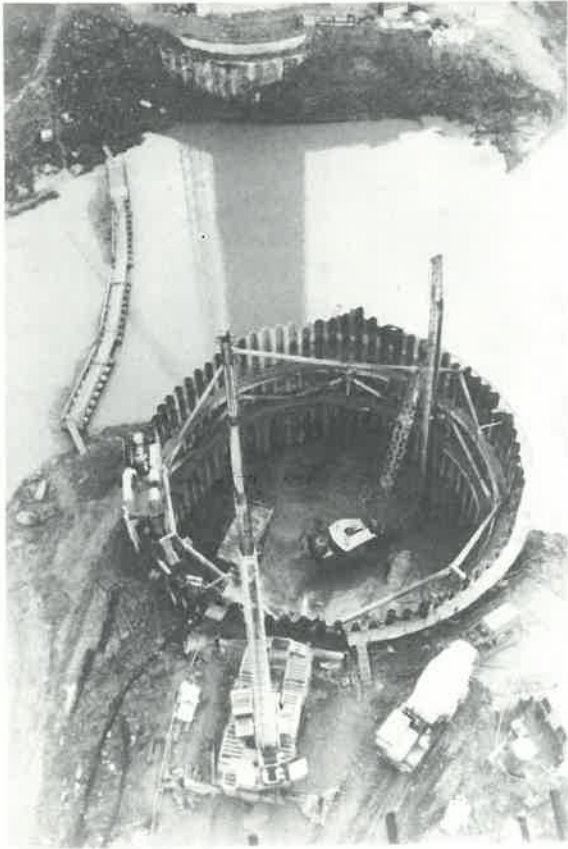


Fig. 9 Veduta dall'impalcato del ponte della fase di realizzazione dei micropali, che riportano in profondità i carichi gravanti nella formazione di arenarie.

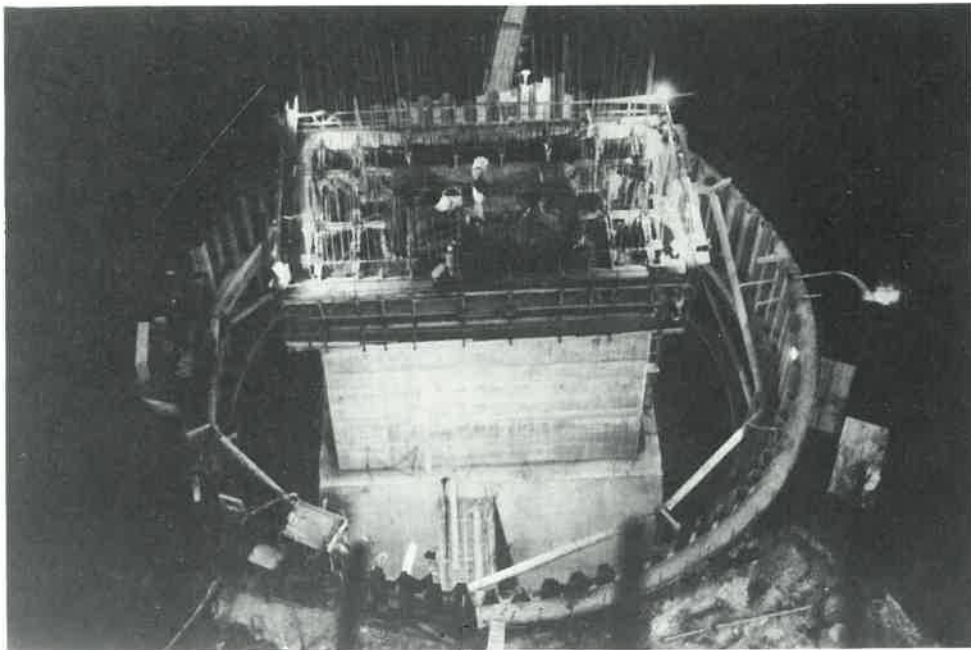


Fig. 10 Veduta notturna del cantiere, durante la fase di elevazione della pila.



### Considerazioni finali:

Il ponte sull'Arno per le dimensioni delle campate, per l'altezza delle pile, associate al requisito richiesto dell'alta velocità dei convogli ferroviari, va considerato il più grande ponte ferroviario italiano ed annoverato fra i maggiori in campo mondiale.

Il lavoro di fondazione è stato compiuto in una zona orograficamente accidentata che presenta diverse situazioni geologiche ed alterazioni, dovute all'esistenza di un corso d'acqua trasformato in bacino idroelettrico.

Il trattamento, mediante procedimento "gravel-grouting" del materiale limoso giacente sul fondo del fiume, ha permesso una completa trasformazione dello stesso da inconsistente in un conglomerato atto a supportare l'infissione della palancolata metallica, le spinte orizzontali trasmesse dalla stessa e a costituire un'efficace barriera contro le infiltrazioni d'acqua indotte dallo svuotamento della tura e dall'asportazione del materiale.

Lo scavo interno del terreno lacustre e del deposito fluviale, ha permesso di raggiungere la roccia di appoggio del tampone di fondo. L'osservazione diretta del piano di fondazione ha fatto constatare la non omogeneità verticale ed orizzontale, del previsto piano di appoggio delle fondazioni dirette.

Il raggiungimento del fondo scavo ha così suggerito di approfondire la base di fondo delle fondazioni mediante "micropali". Il loro utilizzo ha avuto il vantaggio non solo di trasferire i carichi alla profondità di 33 m dal pelo libero dell'acqua, ma anche e contemporaneamente, di permettere il consolidamento della formazione rocciosa fratturata e di "legare" fra di loro gli strati di roccia eterogenea "arenarie e marne").

Infine da un punto di vista tecnologico esecutivo, la pila n° 27 ha offerto l'occasione di studiare e sviluppare una organizzata cantieristica fluviale valida in futuro, per corsi d'acqua anche di maggior importanza.

Si ringraziano vivamente l'Ente F.S. ed il Consorzio FE.S.P.I. per aver resa possibile la stesura di questa memoria, specie per la documentazione tecnica distribuita in occasione della visita compiuta nei cantieri dal Gruppo dell'A.G.I., in data 28.10.1988.

In particolare si ringrazia il Dott. Ing. Alessandro Bertoli, Direttore del cantiere per le fondazioni sull'Arno, che ha costituito una preziosa fonte di informazioni sui lavori per la pila n° 27.

**SUMMARY** - The crossing of the River Arno by the Rome-Florence Expressway, the new railway line being built by the Italian State Railway Board and now nearing completion, posed some difficult problems with regard to the design and construction of the foundations. The railway viaduct is built of prestressed reinforced concrete and is statically indeterminate: it has 70 m central spans and the height of the bridgebeams over the Arno is approximately 50 m.

In order to reach foundation bed, the plinth of the central pier had to be constructed entirely beneath the river bed, for hydraulic reasons.

In order to reach the rock bed on which the foundations of the piers were to rest, three cofferdams were built using jettis from the riverbank and pontoons for the central pier. For the central pier 27, the most problematical from the engineering point of view, the work was carried out in the following stages:

- a) Formation of a gravel-grouting ring, i.e. a series of jet-grouting columns into which a certain quantity of the gravel is injected during the conglomeration of the soil. The grouting ring was made immediately above the formation of marly sandstone to be used as a bed for the foundations of the pier.
- b) Erection of circular sheet piling from pontoons and subsequent completion of the gravel-grouting cofferdam on either side of the sheet piling up to a height sufficient to enable the base of the piling to be firmly held.
- c) Installation of rib braces and lowering of the level of water inside the cofferdam and open excavation, with the level of the river kept low by sluice-gates a little further downstream.
- d) Casting of the concrete bed for the foundation plinth of the pier.
- e) Integration of concrete bed with the rocks on the river bottom by means of the erection of micropiles 300 mm in diameter and of a length and inclination such as to transfer and distribute the in-depth loads onto the formation of marly sandstone, in order to ensure sufficient bearing capacity and to staple the layers of sandstone.
- f) Casting of the foundation of the pier and subsequent work in elevation.

For the two riverbank piers the work phases were much simpler.

For pier 28: construction of a watertight circular cofferdam formed by a series of strip-micropiles 220 mm in diameter, and micropiles also stapling the concrete bed and the supporting rock.

For pier 26: construction of a partial cofferdam affording protection on the river side by means of gravel-grouting; subsequent completion of the cofferdam with a series of micropiles and, finally, more micropiles to form a staple between the concrete bed and the supporting rock.

All the phases described above involved a whole series of difficult operations. The illustrations show some of the phases of the foundation work and are intended also to give an idea of the fundamental geometrical aspects of the problem.

The drawings also show the stratigraphic sequence of the terrain.