

Pali sperimentali e palificate trivellate in terreni argillosi

C. TEDESCHI *

SOMMARIO: Si espongono i risultati di prove di carico effettuate su pali trivellati sperimentali, sia isolati che riuniti in gruppi di cinque, eseguiti nei terreni argillosi su cui sorge la Centrale Termoelettrica del Mercure nonché i risultati delle misure dei cedimenti riscontrati nelle prove di carico su pali trivellati isolati delle palificate di fondazione delle opere principali della predetta Centrale e quelli delle analoghe misure effettuate nel periodo 1963-1966 sul complesso di opere realizzate.

1. Pali trivellati sperimentali isolati.

Prove di carico eseguite nel 1958.

Nella primavera del 1958 vennero iniziati nella zona, sismica di 2^a categoria, dell'allora costruenda Centrale Termoelettrica del Mercure, gli studi geognostici per determinare le caratteristiche fisiche e meccaniche del sottosuolo onde acquisire gli elementi per la determinazione del tipo di fondazione da adottare per le grandi opere sia in cemento armato che metalliche.

Vennero eseguiti dei sondaggi esplorativi, secondo un piano prestabilito in relazione ai risultati delle più vicine trivellazioni realizzate a scopo minerario.

Successivamente, dall'esame delle varie stratigrafie rilevate, si dedusse l'opportunità di realizzare, per sottoporli a prove di carico, due pali trivellati, di lunghezze utili differenti, costruiti entrambi con tubo-forma di diametro interno 400 mm, previsti per portanza 40 tonnellate, in calcestruzzo di cemento normale, dosato a 3 q.li/m³, armati nella parte superiore, per una lunghezza di 6,00 m con 6 Ø 14 e staffe Ø 6, in acciaio Aq 42, opportunamente intervallate.

Il palo di prova n. 1 venne ubicato fra i sondaggi 5 e 17 e quello n. 2 fra i sondaggi 5 e 8, ricadendo il primo nella zona dell'edificio della Centrale Termoelettrica ed il secondo nella zona dei generatori di vapore.

La relativa disposizione planimetrica e le stratigrafie del terreno sono riportate nelle figg. 1 e 2.

Le lunghezze utili dei suddetti pali di prova, rispettivamente di circa 21 e circa 15 metri, vennero stabilite in funzione delle caratteristiche dei terre-

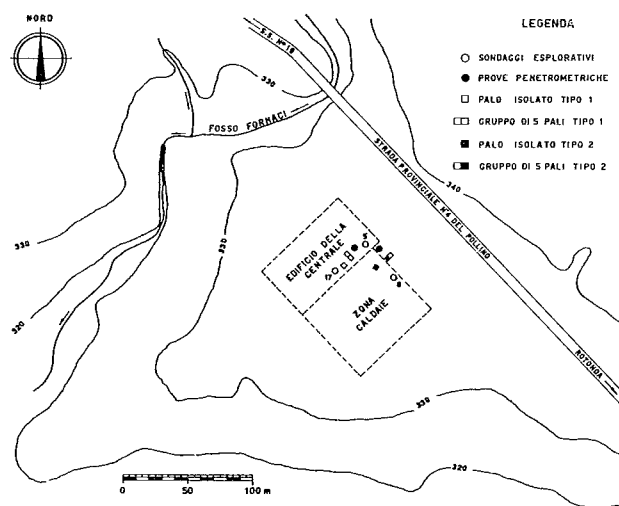


Fig. 1. - Pali trivellati di prova isolati e in gruppi di 5. Planimetria.

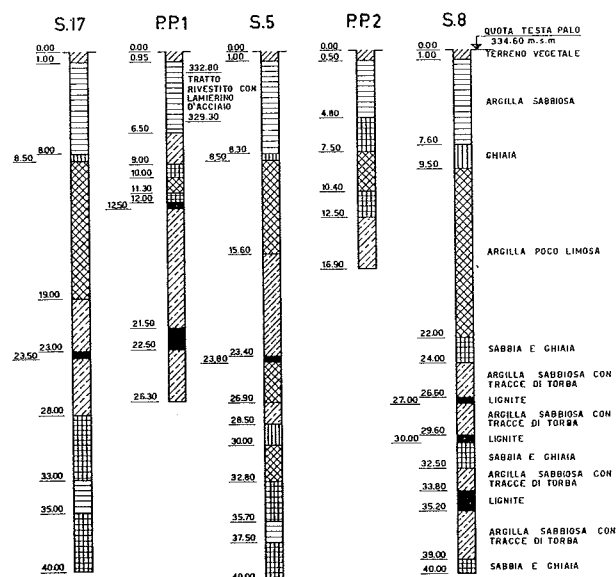


Fig. 2. - Pali di prova isolati. Stratigrafia del terreno.

* Dott. Ing. CESARE TEDESCHI, V. Direttore *Centro Progettazioni e Costruzioni Termiche* - ENEL - Compartimento di Napoli.

ni interessati, tenendo conto delle presumibili quote di testa palo finito, corrispondenti all'intradosso delle strutture di fondazione in cemento armato.

In particolare poichè, come sopra detto, il palo di prova n. 1 ricadeva nella zona dell'edificio della Centrale, previsto con piano cantinato generale avente presumibilmente calpestio alla q. 331 circa, il primo tratto di detto palo, fra le quote 332,80 e 329,30, venne rivestito con lamierino di acciaio, onde realizzare, con sufficiente sicurezza, la lunghezza utile prefissata.

L'installazione di prova fu per entrambi i pali di tipo tradizionale con incastellatura di reazione in legno e contrappeso formato da misto, proveniente dall'alveo del fiume Mercure.

La determinazione dei cedimenti venne effettuata con letture e tre flessimetri.

Nelle figure 3 e 4 sono riportati i diagrammi ca-

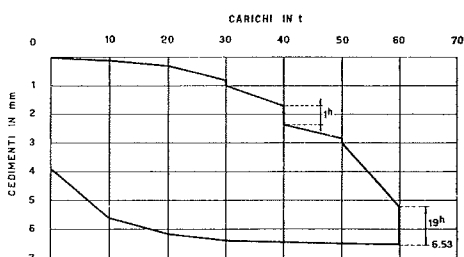


Fig. 3. - Palo isolato tipo 1. Prova di carico 1958.

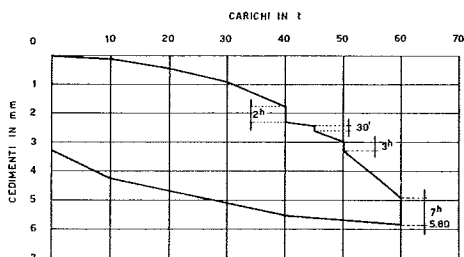


Fig. 4. - Palo isolato tipo 2. Prova di carico 1958.

richi-cedimenti (questi come medie delle letture ai tre flessimetri predetti) risultanti dalle prove di carico eseguite nei giorni 12-13 maggio 1958 per il palo n. 1, gettato il 24 aprile 1958 e nei giorni 19-20 maggio 1958 per il palo n. 2, gettato il 22 aprile 1958.

Il carico massimo di prova, pari a 60 tonnellate, venne mantenuto costante per 19 ore circa nella prova del palo n. 1 e per 7 ore circa, per ragioni contingenti, nella prova del palo n. 2.

In questa fase delle prove le ricerche geognostiche vennero sospese in dipendenza dei nuovi programmi stabiliti per la realizzazione dell'Impianto Termoelettrico.

Prove di carico eseguite nel 1961

Verso la fine di maggio 1961 venne ripresa la campagna geognostica.

Nel complesso di determinazioni da eseguire in sito e in laboratorio venne compresa la ripetizione delle prove di carico sui pali sopra citati, conservatisi integri, da effettuarsi come di seguito precisato e l'esecuzione di prove di carico su due gruppi di cinque pali ciascuno, realizzati in adiacenza dei pali di prova isolati di cui sopra. I pali di ciascun gruppo dovevano avere le caratteristiche di quello isolato corrispondente (v. paragrafo 2 seguente).

In aggiunta a quanto precede venne anche deciso di sottoporre i due pali isolati ad una prova di carico eccezionale, allo scopo di determinarne, ove possibile, il carico di infilaggio.

A tale scopo i contrappesi furono realizzati in modo da poter assoggettare i pali predetti a carichi superiori alle 100 tonnellate.

Venne anche stabilito di effettuare la determinazione dei cedimenti con letture a quattro flessimetri.

Nella figura 5 sono riportati i diagrammi carichi-

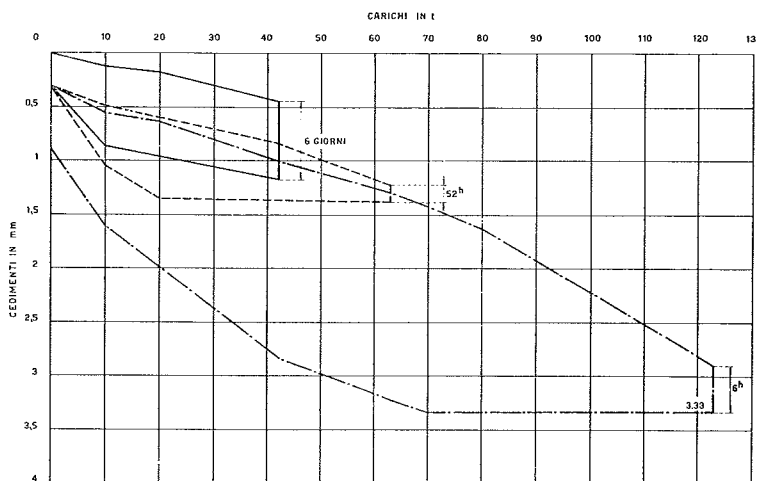


Fig. 5. - Palo isolato tipo 1. Prova di carico 1961.

cedimenti, questi come medie delle letture eseguite per il palo n. 1 nei giorni:

- 29 - 30 - 31 maggio e 1 - 2 - 3 giugno, con carico costante di 41,7 tonnellate;
- 13 - 14 - 15 - 16 giugno, con carico massimo 63,2 tonnellate mantenuto costante per 52 ore;
- 16 - 17 giugno fino a raggiungere il carico massimo eccezionale di 122,7 tonnellate mantenuto costante per 6 ore.

Nella figura 6 sono riportati gli analoghi elementi per le prove eseguite sul palo n. 2 negli stessi giorni sopra riportati e, ordinatamente, con i seguenti carichi:

- costante, per 5 giorni, 38,5 tonnellate;

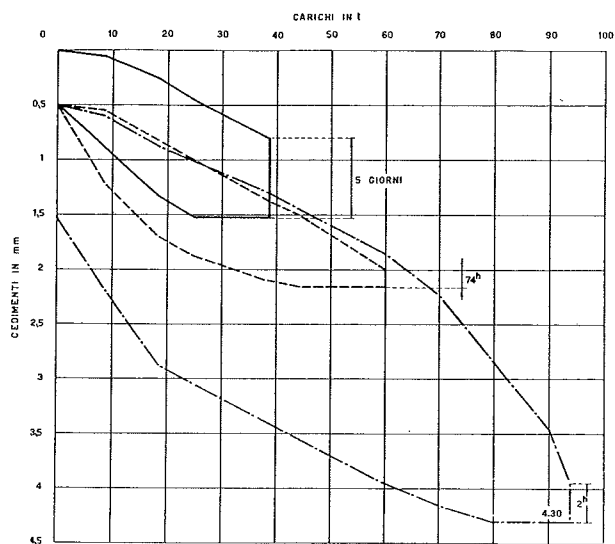


Fig. 6. - Palo isolato tipo 2. Prova di carico 1961.

- massimo, pari a 60 tonnellate, mantenuto costante per 74 ore;
- massimo eccezionale, di 94 tonnellate, mantenuto costante per 2 ore.

2. Prove su due gruppi sperimentali di 5 pali ciascuno.

Come precisato nel paragrafo precedente si decise di procedere a prove, prolungate nel tempo, a carico costante, eguale a quello massimo previsto di esercizio, su due gruppi di 5 pali ciascuno.

Ai pali di ciascun gruppo vennero assegnate, rispettivamente, le caratteristiche dei pali isolati n. 1 e n. 2. Ciascun gruppo venne realizzato nelle immediate adiacenze del corrispondente palo isolato.

Queste prove di carico, di notevole importanza pratica vennero decise ed effettuate in quanto, in relazione ai risultati sperimentali già acquisiti, si

era ormai stabilito di realizzare le fondazioni delle strutture più importanti e più pesanti della costruenda Centrale Termoelettrica su pali trivellati di portanza 45 tonnellate:

Nelle figure 7, 8 e 9 sono riportate ordinatamente:

- l'insieme del dispositivo adottato per la realizzazione del carico di prova;
- l'ubicazione planimetrica dei pali di ciascun gruppo;
- le stratigrafie in corrispondenza dei pali n. 5 di ciascun gruppo ed i diagrammi delle prove penetrometriche, effettuate in adiacenza dei 2 gruppi di pali con penetrometro statico, tipo olandese.

La misura dei cedimenti veniva effettuata per letture alle aste metriche, sistemate come indicato nelle figg. 7 e 8 in corrispondenza di ogni palo di ciascun gruppo, a mezzo di livello ad alta precisione disposto su caposaldi (uno per ciascun gruppo di pali) assolutamente fissi.

Le misure effettuate da operatori molto esperti e con ogni possibile precauzione garantivano la precisione al decimo di millimetro.

Il peso necessario per realizzare il carico massimo di esercizio previsto venne formato con (v. fig. 7):

- pilastri e plinto in cemento armato, considerato con peso specifico $2,4 \text{ t/m}^3$, aventi peso complessivo 17 tonnellate;
- 120 rotaie Vignole da 36 kg/m , usate, disposte come in fig. 7 per formare appoggio del contrappeso propriamente detto, e portate da due coppie di travi reticolari in ferro, da mettere in opera, a prove ultimate, nell'officina montaggio della vicina stazione di trasformazione di Rondona. Anche per le rotaie Vignole predette era prevista la successiva utilizzazione nel quadro

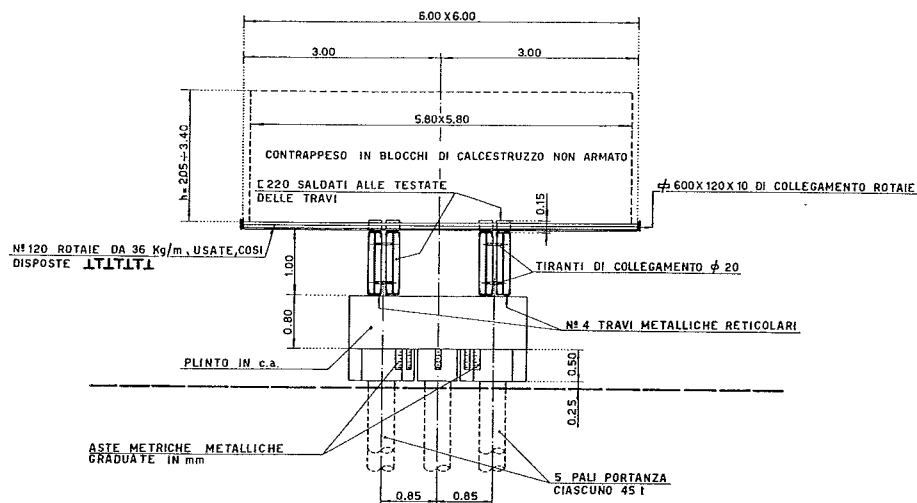


Fig. 7. - Gruppi di 5 pali. Dispositivo carico di prova.

all'aperto della stazione sopra citata. Peso complessivo di queste parti metalliche 31 tonnellate;

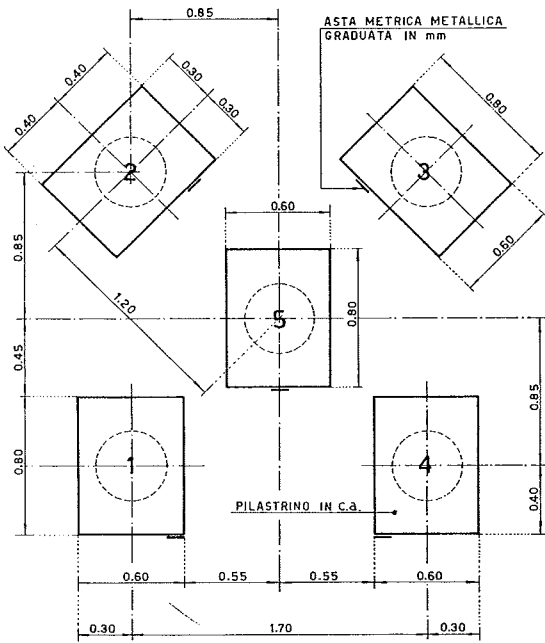


Fig. 8. - Gruppi di 5 pali. Ubicazione planimetrica.

— contrappeso propriamente detto, costituito da blocchi parallelepipedi in calcestruzzo cementizio non armato, di peso specifico medio $2,2 \text{ t/m}^3$ (dedotto come media di diverse pesate dirette). I singoli blocchi erano previsti con volume di poco variabile all'aumentare dell'altezza del contrappeso stesso.

Per raggiungere il carico di prova di 225 tonnellate venne aggiunto il necessario numero di blocchi, da 1 m^3 ciascuno, al sovraccarico uniforme avente pianta $5,80 \text{ m} \times 5,80 \text{ m}$ e altezza $2,05 \text{ m}$. Tutti questi blocchi vennero successivamente utilizzati nella costruzione di opere di difesa fluviale.

Le misure dei cedimenti per ogni palo di ciascun gruppo, effettuate come sopra detto dalle apposite postazioni, vennero iniziate il giorno 8 agosto 1961.

Il carico totale massimo di esercizio, pari a 225 tonnellate per ciascun gruppo di pali, venne raggiunto il 21 ottobre 1961 per entrambi e mantenuto costante fino all'8 marzo 1962 per il gruppo di pali n. 1 e fino al 22 febbraio 1962 per quello n. 2.

Nella figura 10 sono riportati i diagrammi tempo-cedimenti per i singoli pali del gruppo del tipo n. 1, mentre nella figura 11 è riportato lo stesso diagramma per i cedimenti medi del gruppo di pali.

Analoghi diagrammi per i pali del gruppo del tipo n. 2 sono riportati nelle figure 12 e 13.

Nei suddetti diagrammi delle figg. 10 - 13 sono indicati anche i periodi di tempo durante i quali sono state effettuate prove di emungimento dal pozzo realizzato in asse ai gruppi di pali, con depressione della falda anche di 16 metri.

All'inizio dei lavori di costruzione della Centrale Termoelettrica le prove vennero interrotte nelle date sopra precisate e non fu possibile rilevare le curve di ritorno per i gruppi di pali, le quali comunque avrebbero avuto scarsa importanza pratica.

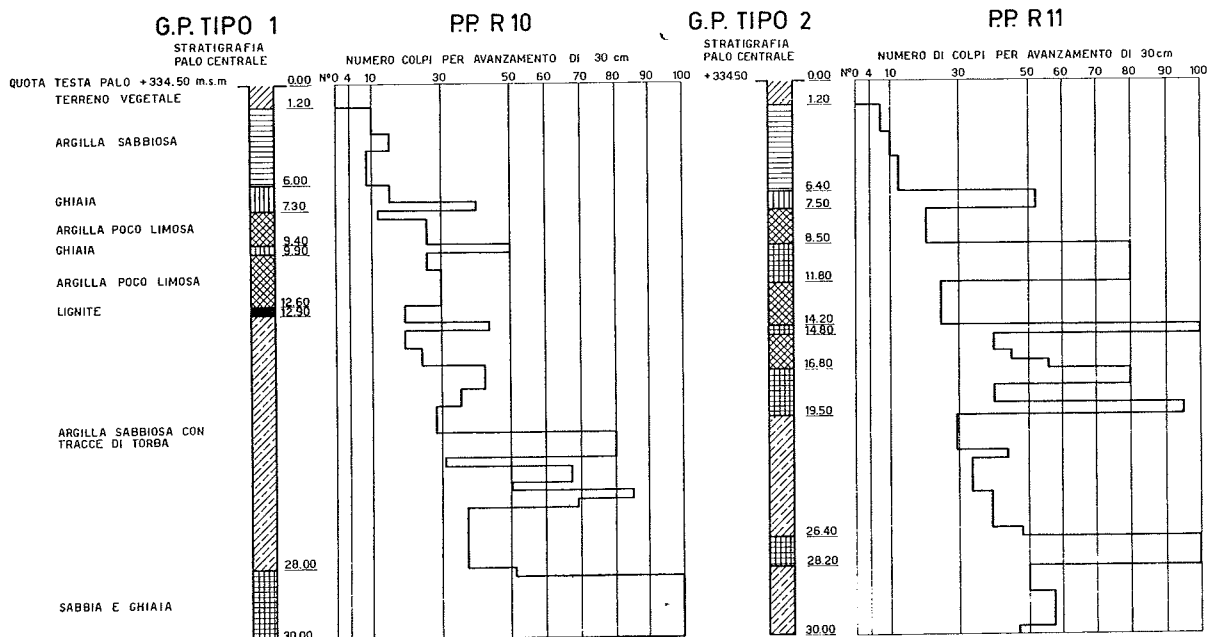


Fig. 9. - Stratigrafie pali centrali dei gruppi e profili penetrometrici vicini.

3. Osservazioni e conclusioni per pali e gruppi di pali sperimentali.

Dalle figure 5 e 6 risulta che nel secondo ciclo di carico delle prove 1961 entrambi i pali isolati hanno avuto cedimento residuo praticamente nullo e pertanto potevano essere considerati in stato elastico. Ciò è anche confermato dal fatto che nel terzo ciclo di carico le curve dei cedimenti, nei tratti corrispondenti, sono abbastanza prossime a quelle del predetto secondo ciclo.

È inoltre di particolare interesse rilevare che:

- il comportamento dei pali isolati nelle prove 1958 è in buon accordo con quello medio di ciascun gruppo di cinque pali, a sua volta praticamente coincidente con il comportamento del relativo palo centrale (n. 5);
- il fattore tempo ha avuto una benefica influenza sul comportamento dei pali isolati di prova come mostrato dalle prove 1961.

Infine dall'esame delle prove sui gruppi di pali risulta praticamente trascurabile l'influenza delle prove di emungimento sopra menzionate.

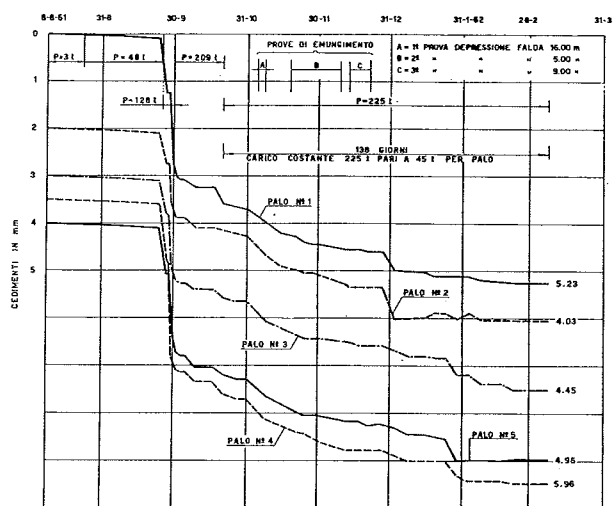


Fig. 10. - Gruppo di 5 pali tipo 1. Cedimenti dei singoli pali.

In base ai risultati sopra esposti ed a quelli delle ulteriori determinazioni eseguite in sito e in laboratorio venne stabilito di adottare, per le palificate della Centrale Termoelettrica del Mercure, pali di caratteristiche analoghe a quelle del palo isolato n. 1 e del corrispondente gruppo di cinque pali.

4. Palificate di fondazione con pali trivellati.

Caratteristiche e numero dei pali

Le caratteristiche assegnate ai pali trivellati, costruiti come detto al paragrafo 1.0. e disposti, generalmente, con interasse pari a tre diametri, furono le seguenti:

- diametro m 0,40
- lunghezza utile m 20,00
- portanza (pari al previsto massimo carico d'esercizio) t 45,00

Queste caratteristiche vennero mantenute costanti per tutte le palificate realizzate, eccezion fatta per quelle relative ai due gruppi turbina-alternatore, per le quali la lunghezza utile venne portata, nel corso dei lavori, a 25.00 metri.

Per tutto il complesso delle principali opere, sia in cemento armato che metalliche, furono realizzati 2908 pali, così suddivisi:

- n. 2 gruppi turbina-alternatore pali n. 420
- edificio della Centrale e sili metallici per lignite » » 1.351
- n. 2 generatori di vapore, relativi mulini ed opere annesse » » 785
- camino scarico fumi e sili cenere (leggera e pesante) » » 352

Totale pali n. 2.908

di cui vennero assoggettati a prova di carico n. 38, pari a circa l'1,3%.

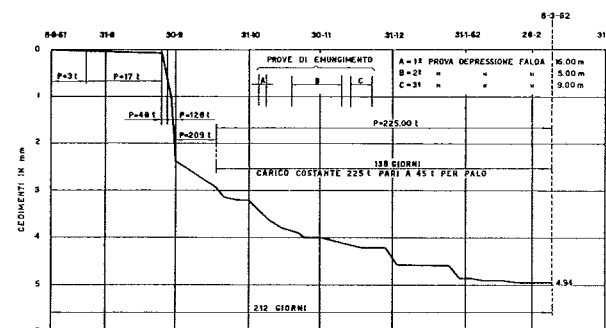


Fig. 11. - Gruppo di 5 pali tipo 1. Cedimenti medi.

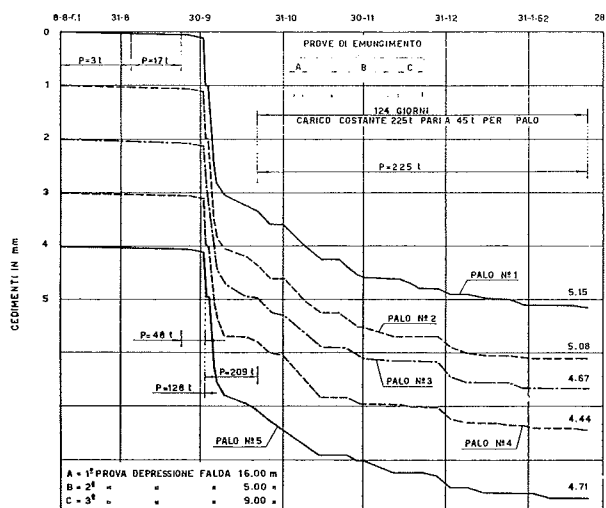


Fig. 12. - Gruppo di 5 pali tipo 2. Cedimenti dei singoli pali.

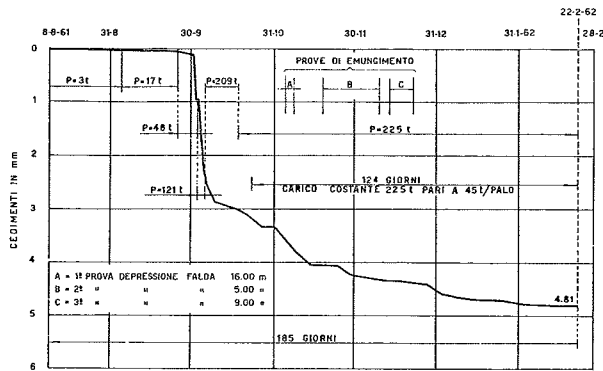


Fig. 13. - Gruppo di 5 pali tipo 2. Cedimenti medi.

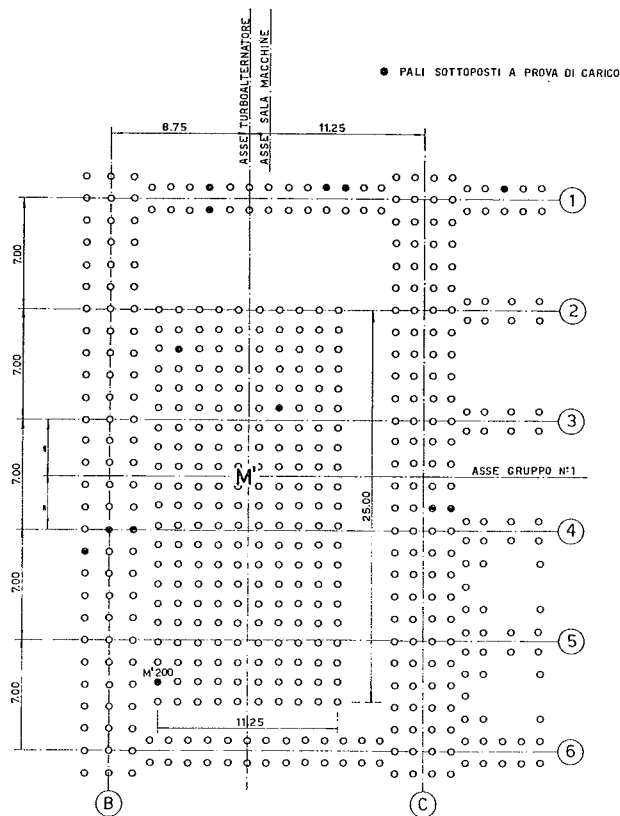


Fig. 14. - Gruppo turbina-alternatore n. 1 e strutture latitanti. Palificata di fondazione.

Nelle figure 14 e 15 sono riportate, a titolo esemplificativo, le palificate di fondazione del gruppo turbina-alternatore n. 1 e strutture latitanti e del complesso generatore di vapore n. 1 e relativi mulini, con l'indicazione dei pali, di esse, sottoposti a prova di carico.

Risultati delle prove di carico su pali isolati

Le prove di carico, sui 38 pali di cui sopra, vennero effettuate creando un'opportuna incastellatura di reazione per realizzare il carico di prova di 67,50 tonnellate, corrispondente a 1,5 volte il suddetto carico massimo di esercizio.

La determinazione dei cedimenti venne effettuata con letture a 4 flessimetri.

Nella tabella I seguente sono riportati, opportunamente raggruppati, i risultati riscontrati durante le prove di carico suddette e che comprendono il cedimento a 45 tonnellate, nella fase di carico, rapido, e quelli a 67,50 tonnellate ed a palo scarico, rispettivamente dopo 24 ore a carico massimo costante e dopo 24 ore dall'avvenuto completo scarico del palo.

Nella stessa tabella sono indicati i valori medi relativi, calcolati tenendo conto di tutti gli effettivi valori misurati.

I predetti valori medi dei cedimenti sono, rispettivamente, 1,018 mm; 2,809 mm; 0,742 mm e comprendono, ordinatamente, il 68,42% dei cedimenti a 45.00 tonnellate, il 60,52% di quelli a 67,50 tonnellate ed il 63,16% dei cedimenti residui a 24 ore dall'avvenuto scarico del palo.

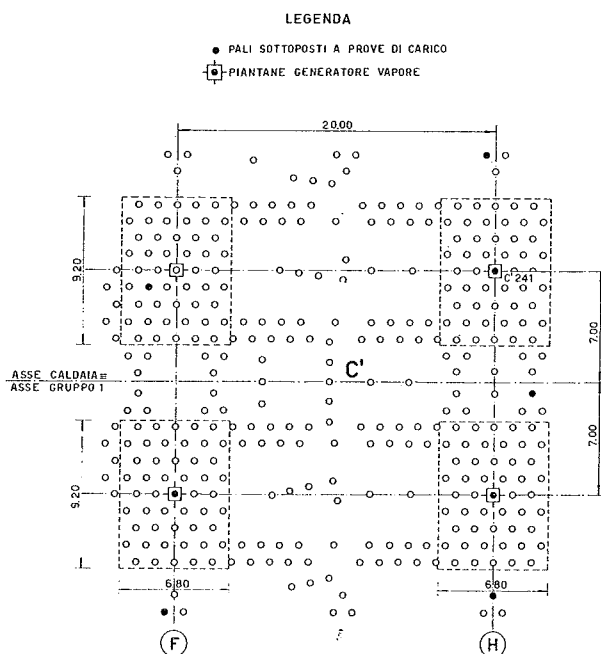


Fig. 15. - Generatore di vapore n. 1. Palificata di fondazione.

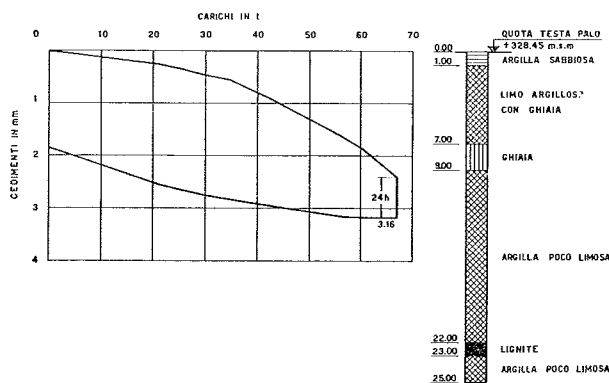


Fig. 16. - Prova di carico palo n. M' 200.

TABELLA I

Cedimenti (mm)	Sotto un carico di					
	45,0 t		67,5 t		0	
	Numero pali	%	Numero pali	%	Numero pali	%
Da 0,00 a 0,40	—	—	—	—	22	57,90
» 0,41 » 0,80	17	44,74	—	—	2	5,26
» 0,81 » 1,05	9	23,68	2	5,27	4	10,53
» 1,06 » 2,00	9	23,68	16	42,09	6	15,79
» 2,01 » 2,85	3	7,90	5	13,16	1	—
» 2,86 » 3,00	—	—	1	2,63	—	2,63
» 3,01 » 4,00	—	—	5	13,16	1	2,63
» 4,01 » 5,00	—	—	4	10,53	2	5,26
» 5,01 » 6,00	—	—	2	5,26	—	—
» 6,01 » 7,00	—	—	3	7,90	—	—
Valori medi cedimenti (mm)	1,018		2,809		0,742	

Anche se in relazione ai risultati delle prove preliminari è necessario prevedere un notevole aumento dei cedimenti nel tempo, il complesso dei dati sopra esposti indica che il comportamento delle varie palificate è sufficientemente omogeneo, in quanto i valori dispersi sono realmente scarsi.

Nelle figure successive sono riportati i diagrammi carichi-cedimenti (questi come media delle letture ai quattro flessimetri) che si possono considerare tipici, rispettivamente, dei pali delle fondazioni dei gruppi turbina-alternatore I e II e dei generatori di vapore I e II.

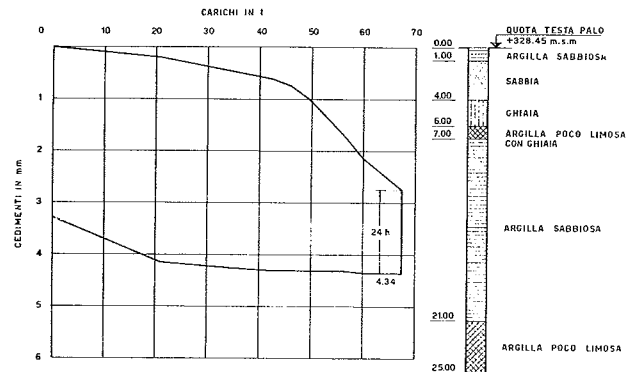


Fig. 17. - Prova di carico palo n. M' 12.

5. Cedimenti delle strutture di fondazione.

Installazione dei caposaldi di controllo

Durante il corso dei lavori, all'atto dell'ultimazione dei getti delle grandi strutture di fondazione in cemento armato, venivano realizzati, in idonea posizione e con le ordinarie modalità, caposaldi murati per il controllo dei cedimenti delle strutture a mezzo di livellazioni di precisione, da effettuare a partire dalla rete di caposaldi predisposta per la costruzione della Centrale Termoelettrica.

Nella figura 20 è stato indicato, schematicamente, il complesso dei punti sottoposti a misure di controllo, con precisata la relativa ubicazione planimetrica.

In particolare si deve osservare che i punti preci-

sati per i due generatori corrispondono, praticamente, ai centri dei plinti di fondazione dei relativi 4 pilastri metallici principali.

Cedimenti misurati ai caposaldi dei generatori di vapore

Si riportano di seguito i diagrammi dei cedimenti misurati, ininterrottamente, fino al 1966.

La figura 21 comprende i diagrammi dei cedimenti riscontrati nelle misure effettuate nel periodo febbraio 1963 - giugno 1966 sui caposaldi del generatore I, per il quale il montaggio delle parti più pesanti fu ultimato nel gennaio 1964.

Nel grafico è compresa la curva dei cedimenti medi, il cui andamento, nella parte terminale, è per-

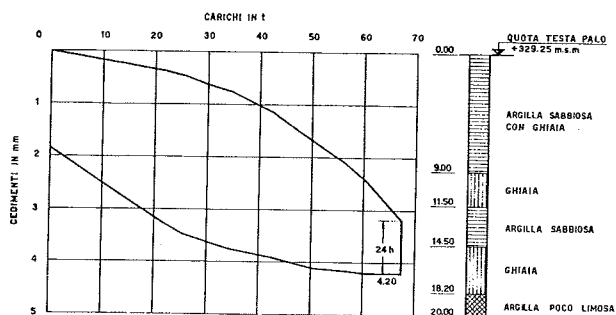


Fig. 18. - Prova di carico palo n. C' 241.

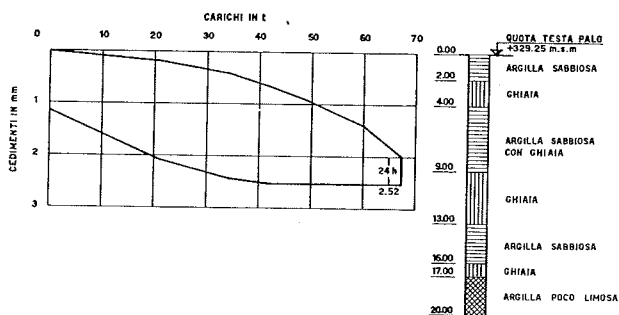


Fig. 19. - Prova di carico palo n. C'' 311.

fettamente conforme alle variazioni di carico sulle fondazioni dovute al fatto che a partire dalla primavera del 1965, per esigenze dell'impianto, i fasci tubieri del generatore di vapore vennero smontati e rimessi in opera a partire dalla fine dell'autunno dello stesso anno.

Nella figura 22 sono riportati, per il generatore di vapore II, i diagrammi, analoghi a quelli di cui sopra, delle misure effettuate nel periodo settembre 1963 - giugno 1966. Per questo generatore il montaggio delle parti più pesanti venne completato nel giugno 1964 e lo smontaggio e rimontaggio dei relativi fasci tubieri nello stesso periodo sopra indicato.

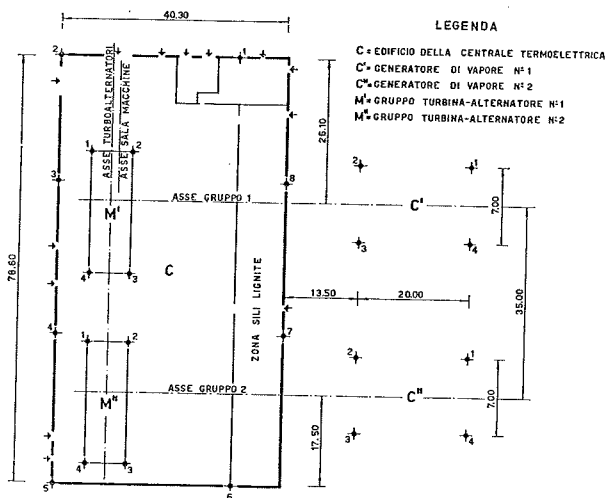


Fig. 20. - Planimetria punti di misura cedimenti.

Cedimenti misurati agli altri caposaldi

Le relative misure interessano periodi di tempo, continui, di durata inferiore a quelli sopra specificati, in quanto in determinati caposaldi le osser-

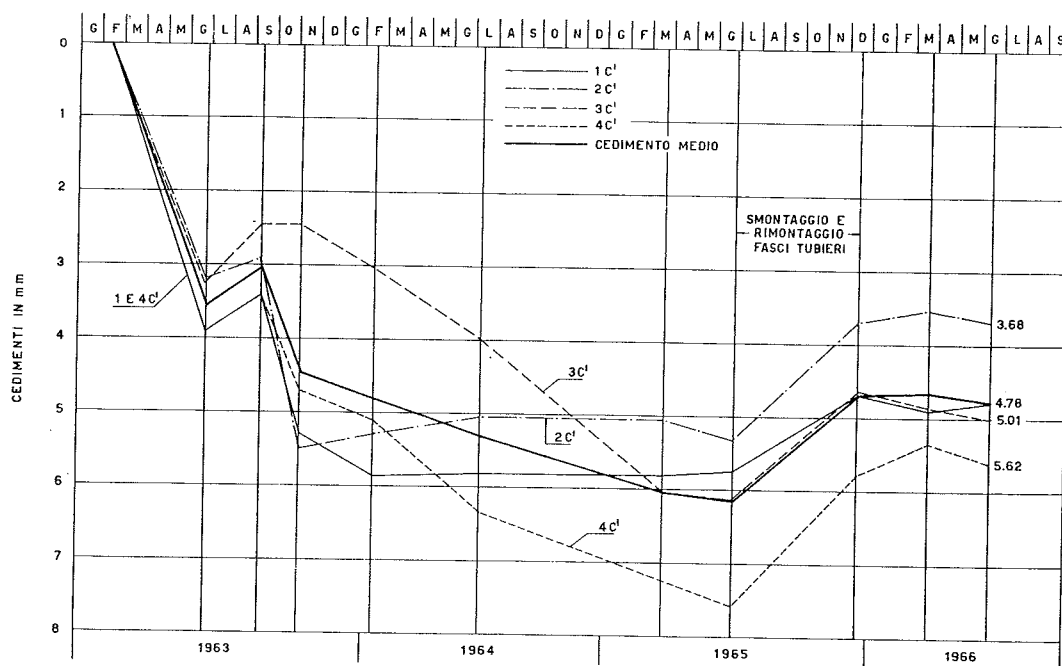


Fig. 21. - Generatore di vapore n. 1. Diagrammi cedimenti.

vazioni hanno dovuto essere interrotte per esigenze varie. Tuttavia dal complesso di misure effettuate si può dedurre, in generale, che l'ordine di gran-

Inoltre tutti i risultati sopra riportati confermano quelli ottenuti con le prove preliminari, sopra precisati.

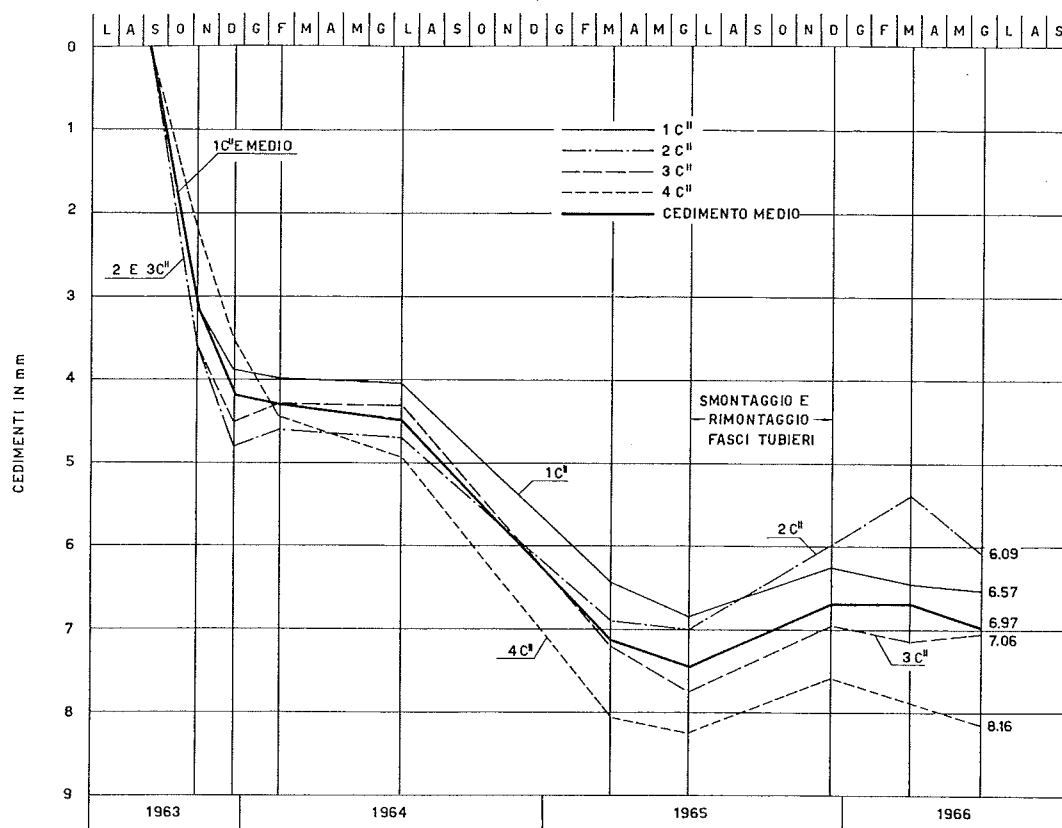


Fig. 22. - Generatore di vapore n. 2. Diagramma cedimenti.

dezza dei cedimenti medi è compreso fra i limiti risultanti dalle figg. 21-22, con differenziali di valore sempre notevolmente modesto.

6. Osservazioni e conclusioni finali.

Il complesso di misure effettuate ad opere realizzate conferma un comportamento sufficientemente uniforme delle palificate di fondazione, come già chiaramente anticipato dalle prove di carico sui 38 pali isolati.

Infatti, in armonia con detti risultati preliminari:

- le prove di carico su pali isolati forniscono, mediamente, risultati conformi a quelli delle « prove 1958 » su pali isolati di prova;
- i diagrammi dei cedimenti delle figure 21 e 22 forniscono valori paragonabili a quelli delle « prove 1961 » su gruppi di 5 pali;
- l'andamento della parte terminale (giugno 1965 - giugno 1966) dei sopra citati diagrammi delle figure 21 e 22 conferma il comportamento elastico delle palificate sotto carico.

SUMMARY

Load tests on piles and pile groups bored in clayey soils.

The Author reports the results of a comprehensive investigation on the piled foundation of the Mercure thermoelectric powerhouse. At the design stage load tests on single piles and on five-piles clusters were performed; piles were

bored into the clayey soils on which the powerhouse had to be founded.

During the construction check tests on several piles of the foundation of the main structure were also performed, and subsequently the settlement of the powerhouse has been measured from 1963 to 1966. All the data thus obtained are related and discussed.