

# Opere al largo e problemi geotecnici

C. MASCARDI \*

**SOMMARIO:** L'Autore delinea brevemente i principali problemi geotecnici delle opere al largo (off-shore). Discute quindi alcune delle memorie presentate al XII Convegno di Geotecnica sul tema: « Problemi geotecnici nelle aree lacuali e marine ».

Alla rassegna sulle opere marittime esposta dal prof. BORZANI aggiungerò un cenno sulle opere al largo (« off shore »).

Caratteristica saliente di queste ultime è di porsi nell'ambiente marino in modo autonomo dalla linea di costa, della quale non possono considerarsi la modifica o l'estensione; le esigenze di profondità di fondale vengono soddisfatte ubicando l'opera là dove tali profondità naturalmente si presentano e non ricorrendo a scavi e dragaggi; le strutture sono generalmente a giorno e quindi le forze orizzontali esercitate dalle onde sono assai meno importanti di quelle dovute all'ormeggio ed all'accosto delle navi, dove tali manovre sono previste. La più recente evoluzione per le piattaforme in alti fondali ha introdotto l'impiego di strutture in c.a. e c.a.p., a causa dell'impossibilità di fornire in tempi ragionevoli le enormi quantità di tubi di acciaio di grande diametro che l'impiego esclusivo di strutture metalliche per le opere richieste dai campi petroliferi del Mare del Nord avrebbe comportato; alcune delle opere in calcestruzzo offrono grandi superfici all'impatto con le onde, che viene in tal caso smorzato da organi dissipatori.

Anche per le opere al largo si riscontrano solitamente quelle particolarità che si possono ravvisare nelle opere marittime in generale:

— la progettazione della sovrastruttura e la scelta del tipo di fondazione sono strettamente interconnesse;

— le impostazioni di progetto sono largamente condizionate dalle prestazioni dei mezzi disponibili. Esempio limite di questo condizionamento sono le strutture in c.a.p. per i campi petroliferi nel Mare del Nord, che hanno potuto essere interamente prefabbricate in particolari

bacini, costituiti da fiordi norvegesi e scozzesi, parzialmente sbarrati e prosciugati.

Per le opere al largo più che per le altre il problema geotecnico è determinante, nel senso che il buon funzionamento dell'opera è condizionato dalla corretta soluzione dei problemi geotecnici inerenti la sua fondazione.

Il tipo di fondazione di gran lunga più impiegato attualmente nelle opere al largo sono i pali di acciaio, il più delle volte infissi per battitura, anche se non mancano esempi interessanti di tipi diversi, principalmente fondazioni dirette molto estese.

Una classificazione delle opere off shore prevede:

— *Pontili*: i tipi accostabili, nei quali gli organi di accosto e di ormeggio sono incorporati nel pontile stesso, possono trovare impiego in condizioni meteomarine relativamente tranquille e per navi di stazza non eccessiva; i tipi con attrezzature di ormeggio e accosto indipendenti si adattano a qualunque condizione.

— *Piattaforme*: sostituiscono i pontili per gli attracchi che prevedono la movimentazione di sole merci liquide; possono avere anch'esse attrezzature di ormeggio indipendenti o, più raramente, incorporate. Tipi speciali sono previsti per lo sfruttamento dei campi petroliferi in mare; esse possono assolvere separatamente o congiuntamente funzioni diverse: supporto per le attrezzature di perforazione o per gli impianti di primo trattamento, sede delle attrezzature logistiche, attracco dei mezzi di servizio o di petroliere.

— *Semisommervibili*: sono strutture dotate di grandi corpi cavi sommersi al disotto della zona perturbata dal moto ondoso, cui si collega una piattaforma alta sul mare, mediante montanti di sezione relativamente ridotta. Possono

\* Dott. ing. Claudio MASCARDI, *Studio Geotecnico Italiano*, Milano.

essere costruite in acciaio o in calcestruzzo e sono ancorate con ormeggi disposti a catenaria o con ormeggi verticali in trazione permanente.

— *Monormeggi a torre*: strutture d'attracco « alla ruota » per movimentazione di un unico prodotto liquido.

— *Monormeggi a boa*: la struttura è sostituita da una grande boa ormeggiata al fondale mediante corpi morti o, più spesso, pali infissi.

— *Campi di boe*: costituite 5 o 7 punti di ormeggio predisposti, in modo da consentire l'ormeggio di navi parallelamente ad una o due direzioni, utilizzando le ancore di bordo.

I problemi geotecnici che le opere al largo comportano sono essenzialmente quelli legati al comportamento dei pali sotto carichi ciclici, sia assiali (compressione e trazione) che trasversali, con rapporti tra l'entità dei secondi rispetto ai primi generalmente assai più elevati che per le strutture terrestri.

Non mancano esempi di pali sollecitati solo trasversalmente (« stack piles » per i punti fissi sul fondale) o prevalentemente a trazione (pali di ancoraggio di serbatoi sommersi o di strutture semisommersibili).

La deformabilità della palificata di fondazione è una caratteristica che interessa conoscere con la miglior approssimazione possibile in almeno due casi tipici: strutture di accosto (breasting dolphins) e piattaforme su alti fondali, per le quali il periodo proprio di oscillazione può approssimarsi a quello delle onde.

Nel primo caso le strutture hanno il compito di smorzare l'abbrivio delle navi assorbendo energia sotto l'urto e restituendola più gradualmente subito dopo.

Non è quindi conservativo assumere per il terreno parametri che gli attribuiscono una deformabilità superiore al reale, in quanto la aliquota di energia elastica scambiata dal terreno verrebbe sopravvalutata, inducendo a dimensionamenti ottimistici gli organi che devono assorbirne la parte rimanente; d'altronde configurare il terreno come più rigido del reale comporta pali di fondazione relativamente corti, che possono poi assumere ad ogni urto cedimenti irreversibili non trascurabili.

Per i pontili può presentarsi anche il problema della stabilità del fondale sul quale essi appoggiano.

Sulle diverse varianti esecutive di pali d'acciaio per opere al largo è già stato esauriente

l'intervento di GRUBAS e VARISCO [1973] al convegno di Milano.

MCCLELLAND [1972] ha efficacemente rappresentato nei due diagrammi di fig. 1 l'evoluzione dei traguardi raggiunti e dei mezzi a disposizione.

Nella memoria presentata dall'ing. Lucio DIAMANTI si passano in rassegna le principali

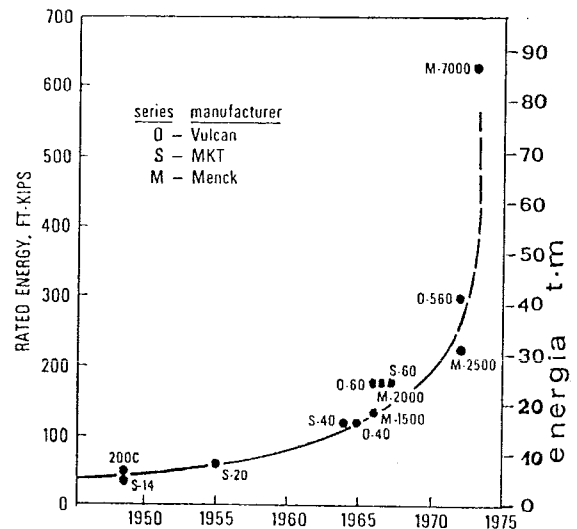
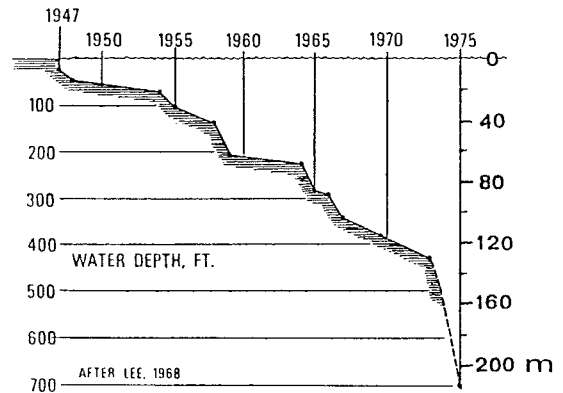


Fig. 1. - Evoluzione di alcune caratteristiche relative alla costruzione di piattaforme marine.

tecniche esecutive oggi adottate per realizzare pali di fondazione in acqua, nelle più diverse condizioni e per qualunque tipo di opera. Per quanto riguarda i mezzi ausiliari si può proporre una classificazione che tenga conto del diverso modo con il quale le difficoltà operative imposte dall'ambiente marino sono affrontate:

a) mezzi galleggianti, soggetti al moto ondoso;

b) mezzi che realizzano un piano di lavoro fisso al disopra delle onde: piattaforme fisse incorporate nell'opera (« template »), piattaforme esclusivamente operative autoelevabili, esecuzione in avanzamento « a sbalzo » di pontili;

c) mezzi che si installano sul fondale, operati da sommozzatori o telecomandati.

I mezzi di quest'ultima categoria sono stati solo recentemente introdotti nell'uso e sono probabilmente destinati a risolvere i gravi problemi esecutivi posti dalle opere su fondali molto profondi.

Per quanto riguarda le limitazioni che l'ambiente pone all'efficienza dei pali infissi, è da porre in rilievo il comportamento singolare di alcune calcareniti tenere nelle quali l'infissione di pali d'acciaio a fondo aperto è molto agevole e, corrispondentemente, l'attrito laterale mobilabile è quasi nullo, mentre pali gettati in opera consentono elevate tensioni tangenziali lungo il mantello. La spiegazione di tale comportamento va probabilmente ricercata nella struttura molto aperta, a nido d'ape, della calcarenite: le azioni dinamiche dell'infissione sotto il tagliente del palo e le vibrazioni trasmesse lungo la sua superficie laterale provocano il collasso della struttura della calcarenite intorno al palo e la formazione di un sottile spazio anulare vuoto tra palo e terreno; i pali gettati in sito (compresi i pali infissi e poi iniettati lateralmente) consentono invece un efficiente collegamento tra palo e terreno. Nel caso di pali che debbano lavorare alternativamente a compressione ed a trazione, il fenomeno ricordato porta ad escludere che la capacità portante a trazione possa essere dedotta dalle usuali formule di battitura, specialmente se il palo è infisso a punta chiusa.

I pali in calcestruzzo gettato in sito trovano forti limitazioni alle applicazioni in mare nella necessità di evitare che il moto ondoso provochi il danneggiamento del getto prima dell'indurimento nel tratto di palo corrispondente al tirante d'acqua.

Un argomento ancora poco studiato dal punto di vista geotecnico è quello della resistenza allo strappo di ancore e corpi morti su fondali sabbiosi.

I problemi geotecnici principali posti dalle fondazioni dirette delle grandi opere off-shore in calcestruzzo sono:

— stabilità dell'equilibrio locale ai bordi della fondazione sotto carichi ciclici tenuto

conto delle possibilità di rammollimento delle argille o di liquefazione delle sabbie, nelle quali si possono accumulare, nelle più severe condizioni di carico, sovrappressioni neutre dell'ordine di  $1 \text{ kg/cm}^2$ ;

— valutazione delle sottopressioni idrauliche differenziali indotte dalle onde di maggiore altezza;

— stabilità allo scorrimento laterale;

— valutazione della deformabilità del terreno di fondazione per l'analisi degli effetti dinamici indotti dal moto ondoso, in particolare per verificare la sicurezza nei confronti di fenomeni di risonanza, che vanno studiati con una realistica simulazione delle contemporanee interazioni onda-struttura e struttura-terreno. I metodi di analisi comprendono quello degli elementi finiti e le prove su modello;

— difesa contro l'erosione del fondale.

Il fondale non viene regolarizzato prima della posa della struttura, che è ubicata dove esso si presenta naturalmente orizzontale e meno irregolare. La base è dotata di un tagliente periferico e di altri intermedi, aventi molteplici funzioni: intrappolano aria e quindi facilitano il galleggiamento al momento della fase di varo della base; localizzando in posizioni favorevoli le reazioni concentrate al momento del primo contatto con il suolo, a struttura solo parzialmente zavorrata; confinano l'iniezione cementizia di contatto che viene eseguita prima dello zavorramento finale; difendono il bordo della fondazione dell'erosione del fondale.

Il carico medio sul terreno di fondazione a struttura completata si aggira sui  $2 \text{ kg/cm}^2$ .

La difficoltà di ottenere informazioni geotecniche quantitative affidabili sui grandi volumi di terreno coinvolti (si pensi al campionamento indisturbato ed alle prove in situ eseguiti fino a 150 m di profondità sotto il fondale e fino a 350 m sotto il medio mare) ha finora sconsigliato l'uso di strutture in calcestruzzo nei fondali compressibili (golfo del Messico) mentre si stanno moltiplicando le applicazioni nel Mare del Nord (vedasi tabella 1), dove si hanno fondali di sabbia densa o di argilla sovraconsolidata. Non è tuttavia improbabile che il miglioramento delle tecniche di indagine e l'esperienza del comportamento delle prime strutture installate [1973-1975] consenta nel prossimo futuro un significativo ampliamento dei limiti attuali.

Un discorso sulle opere marittime non esaurisce tuttavia il tema proposto; esso è assai più ampio ed è stato inoltre interpretato in senso estensivo dagli autori di buona parte delle memorie presentate.

I problemi geotecnici nelle aree lacuali e marine strettamente intese sembra debbano intendersi quelli connessi con la stabilità e gli assestamenti dei fondali lacustri o marini e delle opere che in essi sono fondate: se si restringe così il concetto del tema, vien subito

di idonei mezzi ausiliari per l'espletamento dei lavori « di campagna »; già si sono illustrate le caratteristiche distintive, sia dal punto di vista progettuale che da quello costruttivo, delle opere marittime.

Non può tuttavia essere sottaciuta la necessità per le opere marittime di una indagine geotecnica preliminare approfondita e dettagliata, dettata dalla importanza economica delle opere stesse ed ancor più della gravosità degli oneri conseguenti ad errate impostazioni progettuali

TABELLA 1  
Opere off shore in C.A. installate o in corso di costruzione nel Mare del Nord

Tipo	Condeep	Sea Tank	Doris	Andoc
N.	5	3	2	1
Impiego	Perforazione Produzione Stoccaggio	Perforazione Produzione Stoccaggio	Stoccaggio e Produz./ Pompaggio	Perforazione Produzione Stoccaggio
Data installazione	2 estate 75 1 estate 76 2 ?	1 estate 75 2 estate 76	30/6/1973 estate 75	estate 76
Fondali (m)	120 ÷ 200 (?)	104 ÷ 155	70 ÷ 94	155
Diam. base (m)	87 ÷ 100	72 ÷ 105	90 ÷ 100	104
Volume Cls. (10 <sup>3</sup> .m <sup>3</sup> )	50 ÷ 70	70 ÷ 115	60 ÷ 80	90
Costo/Cad. (10 <sup>9</sup> .Lit.)	48	50		

Totale 9, di cui 1 operante e altre 4 complete entro il 1975

da notare che, dal punto di vista geotecnico tra i fondali ed i piani di campagna emersi sono molto più numerose le somiglianze che le differenze; tra queste ultime si possono citare: la presenza di uno strato superficiale fangoso spesso ancora in corso di consolidazione, tipico dei fondali [vedasi NOORANY e GIZIENSKI, 1970], mentre nei terreni coesivi teneri emersi si ha invece spesso una crosta essiccata più consistente; l'assenza di un'azione di modellazione operata dagli agenti atmosferici e la presenza in sua vece della modellazione operata dai moti ondosi e dalle correnti; infine la relativa rarità dei fenomeni transitori o evolutivi nelle condizioni idrodinamiche.

Non vi sono nelle aree marine e lacuali altre particolarità nei riguardi delle indagini in sito ed in laboratorio che quelle inerenti all'impiego

a seguito di una conoscenza degli aspetti geotecnici dei problemi non sufficientemente approfondite. Analogamente a quanto succede per le gallerie con rilevante copertura, per le grandi opere marittime il costo ed il tempo richiesti dalle indagini geotecniche preliminari sono ingenti, specie se considerati con l'ottica che caratterizza le fasi precedenti al giudizio di fattibilità ed alla decisione di costruire: tuttavia ciò non deve in alcun modo indurre a ridurre quantitativamente e qualitativamente le indagini stesse, pena il rischio grave di incorrere in sede esecutiva in danni e maggiori oneri molte volte superiori al presunto « risparmio » iniziale. La regione che ci ospita offre esempi macroscopici a convalida dell'asserto precedente, anche a motivo delle sue condizioni geologiche e geotecniche particolarmente difficili.

Oltreché da fattori economici, la necessità di una indagine preliminare approfondita è determinata dalla ricordata interdipendenza scelta della fondazione e progettazione della sovrastruttura, ragione per la quale la previsione quantitativa del comportamento del terreno può essere necessaria fin dal momento delle prime scelte progettuali.

Una indagine adeguata dovrà allora in generale consentire non solo una sommaria ricostruzione della stratigrafia, ma una caratterizzazione geotecnica precisa delle singole formazioni rinvenute, ottenuta grazie all'esecuzione di un congruo numero di prove geotecniche sia in situ che in laboratorio. Di regola tutti i principali quesiti posti dai problemi del caso in sede progettuale devono essere risolti sulla base di dati certi e non di ipotesi da verificare in sede esecutiva.

Sui mezzi ausiliari da impiegare nelle indagini geotecniche si diffonde la memoria presentata dall'ing. VITULLO, che indica anche i criteri di scelta tra le varie opzioni in funzione delle caratteristiche delle singole applicazioni.

Le restanti memorie, che riguardano indagini sperimentali, maggiormente si prestano ad incentivare una discussione che ci auguriamo vivace ed approfondita; a questo scopo sono dirette le osservazioni e le domande che ho formulato avvalendomi anche del consiglio dell'ing. Jamiolkowski.

Le memorie di BILOTTA - VIGGIANI e di GARASSINO - JAMIOLKOWSKI - PASQUALINI riguardano entrambe indagini sperimentali eseguite nel terreno di Porto Tolle; al di là della diversità dell'oggetto della ricerca, esse sono accomunate anche da una profonda affinità per quanto attiene il metodo adottato per giungere a conclusioni affidabili: inquadramento teorico chiaro dei problemi trattati, controllo su opere in vera grandezza del comportamento reale mediante una accurata strumentazione, confronto e chiarimento reciproco tra dati teorici e sperimentali.

GARASSINO, JAMIOLKOWSKI e PASQUALINI mostrano come il comportamento di un terreno sabbioso chiamato a reagire dai pali caricati orizzontalmente possa essere soddisfacentemente rappresentato dalla semplice legge:

$$E_s(z) = k \cdot z$$

purché  $k$  venga assunto, per lo stesso palo e per lo stesso terreno, variabile in funzione del

carico applicato e quindi dello spostamento in superficie  $y_t$ , secondo la relazione:

$$k = a \cdot (100 y_t/D)^m$$

I coefficienti  $a$  ed  $m$  appaiono sensibilmente diversi per i tre pali esaminati e crescenti al crescere della rigidità dei pali; non sono forniti criteri di valutazione delle variazioni di  $a$  ed  $m$  in funzione delle caratteristiche del terreno: è possibile approfondire l'argomento fino a fornire criteri per la valutazione preventiva di  $a$  ed  $m$  in funzione dei dati geotecnici e geometrici del problema?

La memoria di BOLOGNINI e MONTELEONE illustra i risultati di una indagine geotecnica compiuta sull'area del nucleo di industrializzazione di S. Eufemia Lamezia, diffondendosi quasi esclusivamente nella descrizione della stratigrafia rilevata e delle caratteristiche medie dei terreni costituenti i singoli strati. Ritengo estremamente interessanti per l'uditorio anche le conclusioni di carattere metodologico che una campagna di così ampio respiro avrà indubbiamente permesso di trarre e prego quindi gli autori di volerci cortesemente ragguagliare anche sui seguenti punti, oltreché sugli altri aspetti metodologici che ritenessero interessanti:

— comparazione tra i risultati ottenuti con i sondaggi elettrici e con sondaggi e prove meccaniche; significato dei primi nel complesso della campagna d'indagine;

— densità dei sondaggi meccanici e delle prove penetrometriche sull'area esplorata;

— intervallo medio di campionamento ottenuto nelle formazioni coesive.

La memoria di MORTARI analizza i risultati di un'indagine geotecnica mediante prove penetrometriche statiche e prove di laboratorio su campioni indisturbati, effettuata nelle argille limose rinvenute nell'area della pista n. 3 di Fiumicino.

Dall'esame dei diagrammi penetrometrici l'autore ritiene di poter riconoscere tratti nei quali la resistenza alla punta  $R_p$  assume valori caratteristici e costanti con la profondità ed attribuisce tale particolare andamento della resistenza con la profondità a fenomeni di quasi sovraconsolidazione per invecchiamento. A questa interpretazione mi pare stimolante contrapporre un'osservazione di tipo metodologico ed una considerazione fondamentale. La

prima riguarda il mezzo: il penetrometro statico tradizionale, nel quale il valore di  $R_p$  si ricava in base alle letture manometriche ottenute per ogni tratto di avanzamento della punta, non pare lo strumento più adatto a rilevare attendibilmente differenze di  $R_p$  così piccole come quelle sulle quali l'autore basa le sue deduzioni, che risultano dai diagrammi tipici presentati.

La seconda è di carattere teorico. L'invecchiamento è un processo che segue la consolidazione primaria, quindi i suoi effetti si sovrappongono e non si sostituiscono agli effetti di questa. Uno strato coesivo omogeneo, al termine della consolidazione primaria, ha resistenza al taglio in termini di sforzi totali proporzionale alla profondità. L'effetto dell'invecchiamento, come ha messo in rilievo BJERRUM [1967], per una stessa durata del fenomeno e per pressioni diverse, è pari a quello che si otterrebbe da un incremento di pressione costante in unità logaritmiche, cioè da un incremento percentuale costante della pressione; l'incremento di resistenza per invecchiamento è quindi ancora proporzionale alla profondità e non si vede come, sommandosi all'originale resistenza proporzionale alla profondità, possa dare tratto del diagramma di resistenza nel quale essa non varia con la profondità.

Per ottenere tratti del diagramma  $R_p(z) = \text{cost.}$  occorre che al diagramma originale, linearmente crescente, se ne sovrapponga un altro, linearmente decrescente con l'identico gradiente. Tale condizione è approssimativamente soddisfatta per gli effetti della sovraconsolidazione per essiccamento, che decrescono con la profondità dal piano definito dalla superficie esposta all'evaporazione. Su tratti brevi analoghi andamenti si possono ottenere per variazioni delle proprietà intrinseche dei terreni coesivi (granulometria, attività colloidale) che possono incidere sia sulla resistenza al taglio  $c_u$  che sul rapporto  $R_p/c_u$ . La molteplicità delle cause che possono far variare il gradiente di  $R_p$

rispetto alla profondità non consente ovviamente neppure una relazione biunivoca tra gradiente di  $R_p$  e durata del processo di invecchiamento, se non, ipoteticamente, nel caso che si riesca per altra via ad accertare che la variazione del gradiente avviene nella costanza di tutti gli altri fattori, salvo l'invecchiamento. È tuttavia così improbabile che a grande distanza di tempo in un dato luogo si sia depositato esattamente lo stesso materiale nelle stesse condizioni, che l'ipotesi non riveste alcun pratico interesse.

A diverse fasi di deposizione corrispondono in generale anche più o meno marcate differenze litologiche e granulometriche, quindi variazioni di resistenza nei terreni coesivi normalmente consolidati assai più sensibili di quelle dovute alla quasi preconsolidazione; a maggior ragione quindi la conoscenza della storia geologica del sedimento riveste interesse per la corretta schematizzazione del suo comportamento geotecnico.

#### BIBLIOGRAFIA

- BJERRUM L. (1967) - *Engineering Geology of Norwegian Normally-consolidated Marine Clays as Related to Settlement of Buildings*. Géotechnique, 17: 81-118.
- GRUBAS F., VARISCO D. (1973) - *Infissione dei pali di acciaio tubolari di grande diametro nelle costruzioni marittime*. Atti XI Convegno di Geotecnica, Milano.
- MCCLELLAND B. (1974) - *Design of Deep Penetration Piles for Ocean Structures*. Journal of Geotechnical Engineering Division A.S.C.E., Luglio.
- NOORANY I., GZIENSKI S. F. (1970) - *Engineering Properties of Submarine Soils: State of the art Review*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division A.S.C.E., Settembre.

#### SUMMARY

##### Off-shore technology and geotechnical problems

The paper reports the text of a contribution to the Panel during Session 2 of the XII Italian Geotechnical Conference, Cosenza, september 1975.