

Sul calcolo statico dei cassoni autoaffondanti in aria compressa

C. MONTUORI *

SOMMARIO: L'A. analizza le forze che agiscono su di un cassone pneumatico durante l'affondamento, mettendo in evidenza le difficoltà che si incontrano nel valutarle. Suggestisce quindi un procedimento per il calcolo statico della struttura del cassone che permette di superare le incertezze accennate fornendo i valori dei limiti superiori ed inferiori delle sollecitazioni agenti sul cassone.

1. Premessa.

Il tipo di fondazione con cassoni autoaffondanti in aria compressa è stato ed è largamente usato; tuttavia la letteratura sull'argomento non è molto ricca, specialmente per ciò che concerne la valutazione delle tensioni che nascono dal complesso stato di sollecitazione cui sono sottoposte le strutture in oggetto durante l'affondamento.

In questo studio, oltre che puntualizzare le cose già note sulla determinazione di questo stato di sollecitazione, si ricava una formula generale che pone contemporaneamente in conto tutte le forze agenti e può costituire una base di calcolo ausiliare ai calcoli convenzionali usuali.

2. Forze globali verticali agenti sul cassone durante l'affondamento.

Le forze globali agenti su di un cassone in fase di affondamento, sono le seguenti (fig. 1):

- peso Q della struttura;
- sottospinta idrostatica S_i ;
- resistenza di attrito del terreno sulle pareti F .

Queste forze sono variabili con « l'affondamento » h del cassone; si indica con h la distanza tra il pelo libero dell'acqua $m-m$ ed il filo del tagliante A .

Riportando in diagramma i valori delle forze Q , S_i ed F in funzione dell'affondamento h , si ottengono gli andamenti riportati in fig. 2. Sovrapponendo i diagrammi delle forze resistenti S_i ed F il valore della forza risultante R potrà essere ottenuto dalla differenza:

$$R = Q - (S_i + F)$$

Esaminiamo ora uno per uno questi tre diagrammi.

* Dott. Ing. Cesare MONTUORI, Napoli.

Peso Q della struttura

Il diagramma di Q è costante per un certo tratto, in dipendenza del fatto che il tagliante ed il solettone di copertura della camera di lavoro si costruiscono in una sola volta fuori terra; se poi la costruzione della parte soprastante prosegue di pari passo con l'affondamento, il diagramma è una

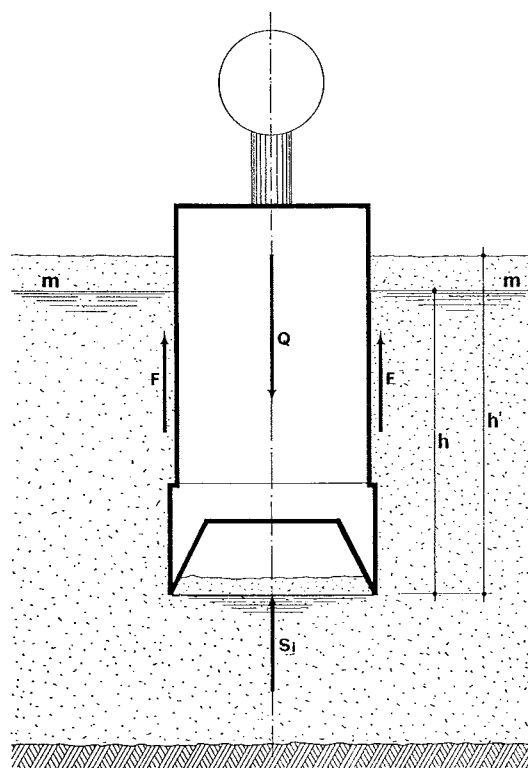


Fig. 1

retta inclinata Q_{norm} ; se invece si deve costruire questa parte più rapidamente, la retta (Q_{rapida}) ha una inclinazione maggiore.

Naturalmente la costruzione del cassone si completerà in tal caso prima che il tagliante raggiunga la sua posizione definitiva; il peso Q resterà quindi

costante nell'ultima parte dello affondamento, ossia da h_1 ad h_t .

Può avvenire talvolta che il peso $Q_{h_1} = Q_{max}$ raggiunto non sia sufficiente ad assicurare la discesa del cassone in questo ultimo tratto; bisognerà allora zavorrare il cassone oppure forzarne la discesa con rapide decompressioni dell'aria nella camera di lavoro.

In riassunto le forze che facilitano l'affondamento sono:

- a) il peso della struttura;
- b) il peso dell'eventuale zavorra (se la canna è vuota);
- c) la forza nascente da una rapida decompressione nella camera di lavoro.

Sottospinta idrostatica

La sottospinta idrostatica S_i è funzione della pressione p esistente nella camera di lavoro, ed è data da:

$$S_i = - Ap = - abp$$

nella quale a e b sono le dimensioni in pianta del cassone.

Se si ammette che l'aria, l'acqua e la sabbia siano in quiete, ossia che l'acqua non sia in moto per entrare nella camera di lavoro, o l'aria per uscirne, si ha $p = h \gamma_w$ ove γ_w indica il peso specifico dell'acqua. L'espressione della sottospinta diviene allora:

$$S_i = - \gamma_w abh \quad (1)$$

Nel diagramma di S_i , riportato in fig. 2, abbiamo per l'appunto considerato il caso che p coincida con la pressione $h \gamma_w$.

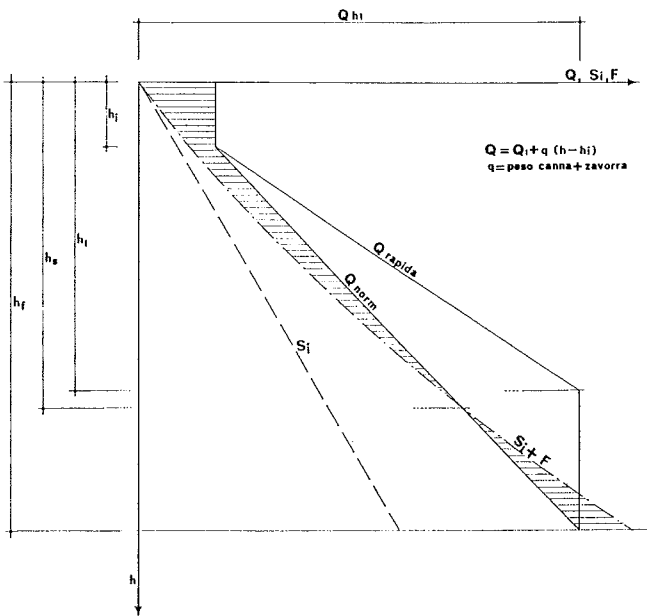


Fig. 2

Resistenza di attrito

La resistenza di attrito in terreni incoerenti, quando il tagliente si trova alla profondità h , vale, per unità di perimetro:

$$f = \frac{1}{2} \mu \lambda' \gamma' h^2$$

In questa formula:

λ' = coefficiente di spinta del terreno immerso

μ = coefficiente di attrito terreno-cassone

γ' = peso specifico del terreno immerso

h' = distanza tra l'estremo A del tagliente e la superficie del terreno.

Ad esempio, se si pone:

$$\mu = 0,3 ; \lambda' = 0,5 ; \gamma' = 1,2 \text{ t/m}^3,$$

si ha (in ton e m)

$$f \approx 0,1 h^2$$

In generale, ponendo $K_F = 1/2 \mu \lambda'$, si ha:

$$f = K_F \gamma' h^2$$

Per quanto riguarda la valutazione di K_F , è chiaro che, in condizioni del genere, una valutazione basata su elaborazioni teoriche è senz'altro molto incerta ⁽¹⁾.

Sarebbe allora opportuno far ricorso ai risultati di misure dirette; purtroppo però ancora pochi sono gli esperimenti fatti e pertanto la valutazione di K_F rimane aleatoria. Dati in proposito sono forniti da TERZAGHI e PECK [1948] e da TOMLISON [1963].

Per avere la resistenza di attrito globale F agente sull'intero cassone, basta moltiplicare la resistenza unitaria f per il perimetro del cassone; si ottiene in tal modo:

$$F = 2 (a + b) K_F \gamma' h^2 \quad (2)$$

Si può quindi ritenere che questa forza cresca con legge quadratica con h' .

La curva a tratti e punti riportata in fig. 2 è la somma $F + S_i$.

⁽¹⁾ Si consideri ad esempio a tal proposito la notevole influenza che può avere sul coefficiente di spinta il fatto che per tutta l'altezza dello scavo il terreno è stato sostanzialmente disturbato dalle operazioni di scavo e di discesa del cassone.

Osservando la fig. 2 si nota che, sino ad un certo affondamento h_s , prevalgono, nel caso normale, le forze peso; per affondamenti maggiori prevalgono le resistenze. Si rileva inoltre che le resistenze di attrito hanno una importanza non indifferente sia per l'affondamento sia, come vedremo, per il dimensionamento della struttura.

La risultante di tutte queste forze può, in definitiva, esprimersi:

$$R = Q - \gamma_w abh - 2(a+b) K_F \gamma' h'^2 \quad (3)$$

Se questa risultante è positiva, il tagliante si infigge nel terreno finchè le reazioni del terreno non la equilibrano; se invece R è negativa il cassone rimane sospeso. Il diagramma di R è riportato con tratteggio in fig. 2.

La resistenza del terreno, per metro lineare di perimetro del cassone, si scrive:

$$r = \frac{Q}{2(a+b)} - \frac{\gamma_w abh}{2(a+b)} - K_F \gamma' h'^2 \quad (3')$$

oppure, più in generale:

$$r = \frac{Q}{2(a+b)} - \frac{pab}{2(a+b)} - K_F \gamma' h'^2 \quad (3'')$$

3. Calcolo delle massime sollecitazioni nel tagliante.

Le forze sollecitanti il tagliante sono le seguenti (v. fig. 3):

- risultante r delle forze verticali per unità di lunghezza del tagliante che si ottiene dalla espressione (3'');
- spinta p dell'aria compressa sulla faccia interna del tagliante;

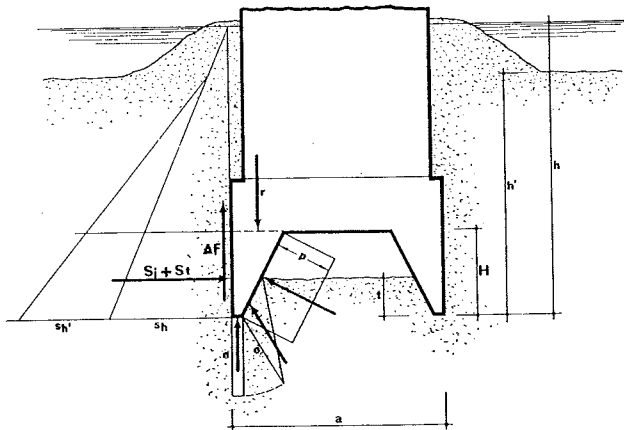


Fig. 3

- spinta s_h dell'acqua sulla faccia esterna del tagliante;
- spinta s_h' del terreno sulla faccia esterna del tagliante;
- forze di attrito ΔF limitatamente all'altezza del tagliante;
- reazione σ del terreno sotto la punta del tagliante.

L'equazione di equilibrio alla traslazione verticale del tagliante fornisce (fig. 4):

$$r = \sigma a' + \frac{1}{2} \sigma t \operatorname{tg} \alpha \cos \delta + \frac{1}{2} \sigma t \operatorname{sen} \delta$$

da cui:

$$\sigma = \frac{r}{a' + 1/2 t (\operatorname{sen} \delta + \operatorname{tg} \alpha \cos \delta)} \quad (4)$$

Il momento flettente di queste forze rispetto al baricentro G della sezione di incastro del tagliante vale:

$$M_r = \frac{r}{a' + 1/2 t (\operatorname{sen} \delta + \operatorname{tg} \alpha \cos \delta)} \left[\frac{a'}{2} (b' - a') + \frac{t}{2} \frac{\cos \delta}{\cos \alpha} \left(\frac{H - t/3}{\cos \alpha} - \frac{b'}{2} \operatorname{sen} \alpha \right) + \frac{t b'}{4} \operatorname{sen} \delta \right] \quad (5)$$

Con questa espressione si potrebbe calcolare il momento nella sezione di incastro generato da un eccesso positivo r del peso rispetto alle forze che ostacolano la discesa del cassone, ove però si conoscesse il valore di t , ossia si potesse determinare di quanto il tagliante si affonda nel terreno. La determinazione del momento M_r mediante la espressione (5) è in effetti complicata dal fatto che le condizioni del terreno sotto al tagliante non sono praticamente valutabili, essendo ivi il terreno variabilmente costipato.

Si può superare però questa difficoltà con un procedimento di calcolo al limite.

Consideriamo anzitutto la funzione $M_r(t)$ espressa dalla (5) (essendo δ l'angolo di attrito terra-calcestruzzo).

Questa funzione è sempre decrescente con δ ; per avere quindi il massimo valore del momento basta fare $\delta = 0$.

Inoltre la funzione $M_r(t)$, data sempre dalla (5), è rappresentabile con una iperbole (manca infatti il termine in M^2).

Per la valutazione del limite superiore di M_r , in corrispondenza di un certo valore di r , basterà quindi calcolare M_r per tre o quattro valori di t , identificando così M_r^{\max} ed il valore di t corrispondente.

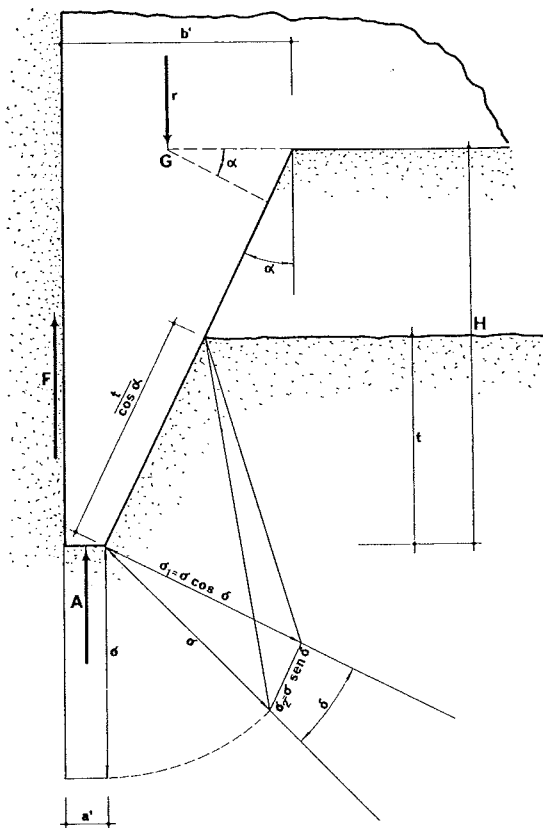


Fig. 4

Con $\delta = 0$ la (5) diventa:

$$M_r = \frac{r}{a' + 1/2 t \operatorname{tg} \alpha} \left[\frac{a'}{2} (b' - a') + \frac{t}{2 \cos \alpha} \left(\frac{H - t/3}{\cos \alpha} - \frac{b'}{2} \operatorname{sen} \alpha \right) \right] \quad (6)$$

ossia:

$$M_r = K r \quad (6')$$

ove K ha le dimensioni di una lunghezza.

Sia K^* il valore massimo della funzione di t che moltiplica r nella (6).

Nella pratica il valore di K^* è di circa $2 \div 3$ metri. Il segno di questo momento è sempre positivo.

I momenti flettenti provocati dalle altre forze sollecitanti il tagliante sono nell'ordine:

— Momento (positivo) della pressione d'aria compressa p agente sulla faccia interna del tagliante:

$$M_p = + p \frac{H}{\cos \alpha} \left(\frac{H}{2 \cos \alpha} - \frac{b'}{2} \operatorname{sen} \alpha \right) \quad (7)$$

— Momento (negativo) provocato dalla spinta dell'acqua sulla faccia esterna del tagliante:

$$M_h = - \frac{1}{2} \gamma_w H^2 \left(h - \frac{H}{3} \right) \quad (8)$$

— Momento (negativo) provocato dalla spinta del terreno:

$$M_t = - \frac{\lambda'}{2} \gamma' H^2 \left(h' - \frac{H}{3} \right) \quad (9)$$

— Momento (positivo) provocato dalle forze di attrito ΔF agenti sul tagliante per unità di lunghezza:

$$M_F = + K_F \gamma' H b' \left(h' - \frac{H}{2} \right) \quad (10)$$

Sommando le espressioni (6'), (7), (8), (9) e (10) si ottiene il momento totale d'incastro sul tagliante per unità di lunghezza del tagliante:

$$M = K r + \frac{p H}{\cos \alpha} \left(\frac{H}{2 \cos \alpha} - \frac{b'}{2} \operatorname{sen} \alpha \right) - \frac{1}{2} \gamma_w H^2 \left(h - \frac{H}{3} \right) - \frac{\lambda'}{2} \gamma' H^2 \left(h' - \frac{H}{3} \right) + K_F \gamma' H b' \left(h' - \frac{H}{2} \right) \quad (11)$$

Se inseriamo al posto di r la (3'') che la esplicita, si ha:

$$M = \frac{K Q (h) p}{2 (a + b)} \left[\frac{H}{\cos \alpha} \left(\frac{H}{2 \cos \alpha} - \frac{b'}{2} \operatorname{sen} \alpha \right) - \frac{K a b}{2 (a + b)} \right] - \frac{H^2}{2} \left[\gamma_w \left(h - \frac{H}{3} \right) + \lambda' \gamma' \left(h' - \frac{H}{3} \right) \right] + K_F \gamma' \left[H b' \left(h' - \frac{H}{2} \right) - K h^2 \right] \quad (12)$$

Ricapitoliamo qui di seguito il significato dei simboli che appaiono nella (12):

- K = coefficiente avente le dimensioni di una lunghezza, desumibile dalla (5) o dalla (6)
 a, b = lati della pianta della camera di lavoro
 $Q(h)$ = peso del cassone alla quota di affondamento h
 p = pressione dell'aria nella camera di lavoro
 H = altezza del tagliente
 b', a' = spessori del tagliente all'incastro ed alla estremità
 γ_w = peso specifico dell'acqua
 γ' = peso dell'unità di volume del terreno in acqua
 h = tirante d'acqua sul filo del tagliente
 h' = altezza di terreno sul filo del tagliente
 λ' = coefficiente di spinta del terreno in acqua
 K_F = $\frac{1}{2} \mu \lambda'$
 μ = coefficiente di attrito terreno-cassone

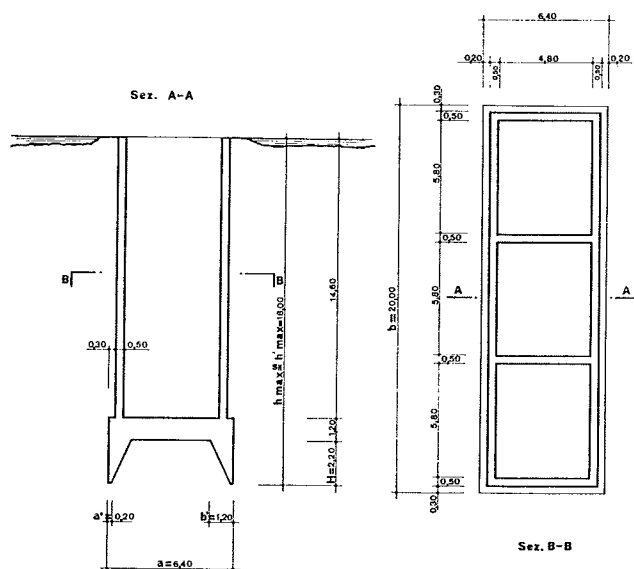


Fig. 5

Mediante la (12) si può progettare la sezione d'incastro del tagliente, ricercando nei casi particolari per tentativi quali sono i valori dei parametri che danno luogo ai valori massimo o minimo di M .

Riportiamo di seguito alcune osservazioni che possono facilitare questa ricerca o abolirla nei casi correnti.

Si osservi anzitutto che il coefficiente del secondo addendo ed il quarto addendo della (12) sono quasi sempre negativi, anche per valori modesti di K , e

pertanto si può considerare, nei casi correnti, come valore limite positivo assoluto del momento, la seguente espressione, ottenuta facendo nella (12):

$$p = 0^{(2)}, K = K^*,$$

e, trascurando l'attrito laterale:

$$M_{\max} = \frac{K^* Q_{\max}}{2(a+b)} - \frac{1}{2} \gamma_w H^2 \left(h - \frac{H}{3} \right) + \frac{\lambda'}{2} \gamma' H^2 \left(h' - \frac{H}{3} \right) \quad (13)$$

Se si ritiene eccessivo trascurare l'attrito, si ha invece:

$$M_{\max} = K^* \left[\frac{Q_{\max}}{2(a+b)} - K_F \gamma' h'^2 \right] - \frac{H^2}{2} \left[\gamma_w \left(h - \frac{H}{3} \right) + \lambda' \gamma' \left(h' - \frac{H}{3} \right) \right] + K_F \gamma' H b' \left(h' - \frac{H}{2} \right) \quad (14)$$

La verifica viene ripetuta per vari valori dell'affondamento h .

Il momento limite minimo si ha invece nella condizione in cui il tagliente non appoggia sul terreno perchè il cassone è rimasto sospeso ($r = 0$), e nel contempo si realizza l'annullamento della pressione per consentire la discesa. Si ha in tali condizioni:

$$M_{\min} = K_F \gamma' H b' \left(h' - \frac{H}{2} \right) - \frac{H^2}{2} \left[\gamma_w \left(h - \frac{H}{3} \right) + \lambda' \gamma' \left(h' - \frac{H}{3} \right) \right] \quad (15)$$

Le verifiche effettuate con la (14) e la (15) sono in generale sufficienti al dimensionamento della sezione di incastro del tagliente; ma è opportuno adottare tensioni ammissibili nell'acciaio alquanto superiori a quelle abituali.

⁽²⁾ Per quanto riguarda il valore minimo della pressione si osservi che questo è un fattore che dipende dalla condotta del lavoro; notevoli cadute di pressione possono rendersi necessarie quali provvedimenti di emergenza per ottenere il disincaglio della struttura.

4. Calcolo delle sollecitazioni nel solettone formante il cielo della camera di lavoro.

Il solettone sarà calcolato ovviamente per il peso proprio più una parte del calcestruzzo di zavorra, che si suppone non aver fatto ancora presa. Inoltre si dovrà aggiungere il momento e lo sforzo normale (di trazione) derivanti dalle reazioni σ sul tagliante; si adopererà pertanto la (14), che dà un momento di segno concorde con quello dovuto al peso proprio ed al sovraccarico.

5. Esempio di calcolo.

Si debba raggiungere la profondità di 18,00 m con un cassone le cui dimensioni risultano dalla

colo tratto finale, la somma delle forze di attrito e della sottospinta, non è necessario prevedere una curva di affondamento rapido che tuttavia tracciamo a titolo di esempio.

Risulta pertanto:

$$\begin{aligned} Q_{\max} &= 3.865 \text{ t} \\ S_{i\max} &= 2.304 \text{ t} \\ F_{i\max} &= 1.711 \text{ t} \\ S_{i\max} + F_{i\max} &= 4.015 \text{ t} \end{aligned}$$

La curva $K(t)$, secondo l'equazione 6, è riportata in fig. 7.

Risulta $K^* = 2,55 \cdot K_{\max}$ supponendo che t non superi il metro.

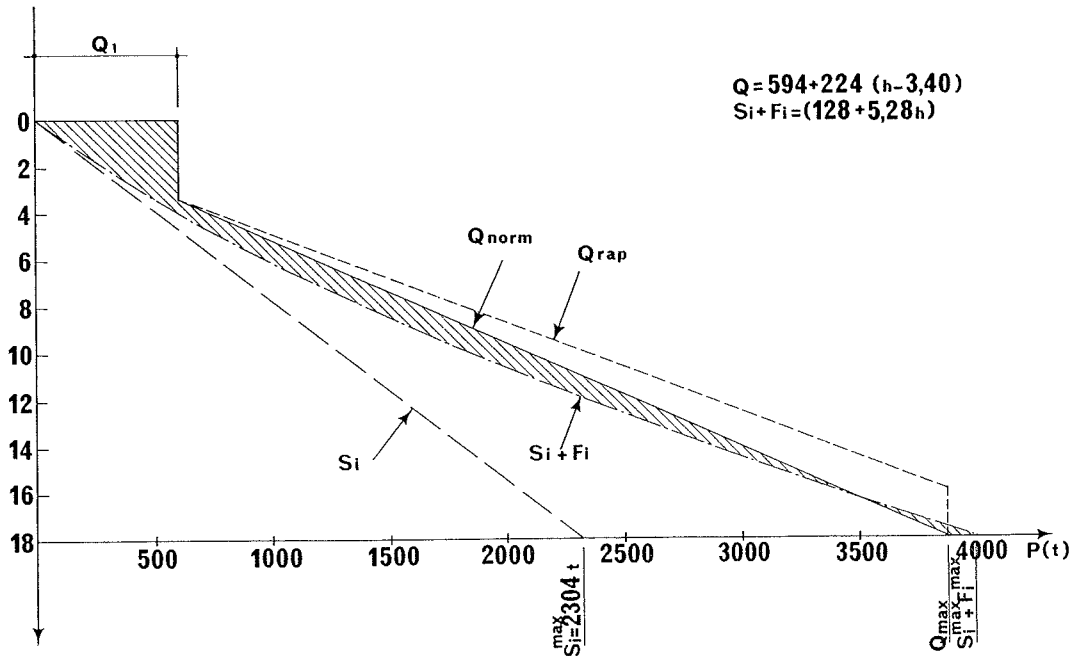


Fig. 6

fig. 5. Il livello del terreno sia pressocchè uguale a quello dell'acqua ($h = h'$).

Si ha:

- Perimetro di calcolo = 48,00 m
- Peso globale della camera di lavoro = 594 t
- Peso del cassone cellulare per ml di altezza: $q_1 = 74 \text{ t/m}$
- Peso del riempimento (zavorra) realizzato con terreno ed acqua: $q_2 = 150 \text{ t/m}$
- La sottospinta vale: $S_i \text{ (ton)} = 128,00 h \text{ (m)}$

Le forze di attrito globali valgono (assumendo $K_F \gamma' = 0,1 \text{ t/m}^3$): $F_i \text{ (ton)} = 5,28 h^2 \text{ (m}^2\text{)}$.

Con questi dati possiamo tracciare il diagramma di affondamento normale (fig. 6). Poichè i pesi, zavorra compresa, superano ovunque, salvo il pic-

Si calcola anzitutto M_{\min} con la (15); risulta:

$$M_{\min} = - 46,4 \text{ tm/m}$$

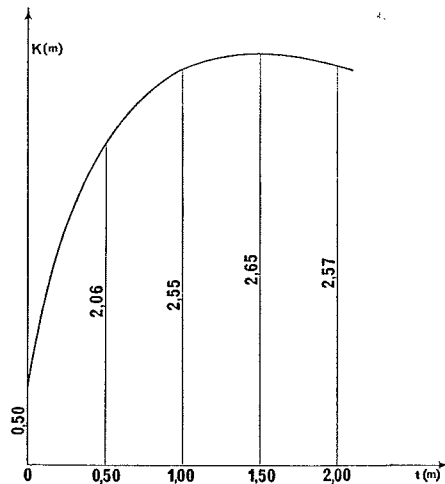


Fig. 7

Il calcolo di M_{\max} viene eseguito per tentativi con la (14) per vari valori dell'affondamento h :

Per $h = 3,40 \text{ m}$, $Q = 594 \text{ t}$, $M_{\max} = 18,5 \text{ tm/m}$
» = 8,00 » , » = 1.624 » , » = 42,5 »
» = 10,00 » , » = 2.072 » , » = 49,6 »
» = 12,00 » , » = 2.520 » , » = 54,7 »
» = 14,00 » , » = 2.968 » , » = 57,7 »
» = 16,00 » , » = 3.416 » , » = 58,7 »
» = 18,00 » , » = 3.864 » , » = 57,6 »

BIBLIOGRAFIA

- CROCE A. (1957) - *Appunti di Tecnica delle Fondazioni e Costruzioni in Terra*. Dispense ciclostilate, Napoli.
- JACOBSON M. (1962) - *Technique des travaux*. Beranger, Paris.
- TOMLISON M. J. (1963) - *Foundation Design and Construction*. Pitman, London.
- TERZACHI K., PECK R. B. (1948) - *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley, New York.

SUMMARY

On the structural design of pneumatic caissons.

The A. analyzes the forces acting on a pneumatic caisson during sinking operations; they are (fig. 2) the weight Q , the uplift S_1 from compressed air in the working chamber, the friction F on caisson's wall. The latter is difficult to be foreseen on the basis of soil properties and theories; empirical values are to be used.

The bending moment acting on the working chamber's walls is given by eq. 5. The equation contains some quantities whose evaluation is highly uncertain; but an upper and a lower limit of the moment (resp. eq. 13 and 15) are easily found.

A numerical example is worked out in par. 5.