

Calcolo delle strutture di fondazione.

W. Z. VLASOV, N. N. LEONT'EV: *Beams, plates and shells on elastic foundations*. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem 1966.

Alla fine del 1966 è apparsa in occidente questa traduzione in inglese del trattato « *Balki, plity i obolochki na ufrugom osnovanii* » di V. Z. VLASOV e N. N. LEONT'EV.

Il volume, il cui indice è riportato in appendice, trae origine da studi di V. Z. Vlasov su un modello costituito da uno strato o un doppio strato elastico, e da lavori di Leont'ev: V. Z. VLASOV e N. N. LEONT'EV « *Teoria tecnica sull'analisi delle strutture su fondazione elastica* », Trudy Moskovskogo Inzhenerostroitel'nogo Instituta. Coll. n. 14, 1956; N. N. LEONT'EV « *Applicazioni del metodo variazionale di Vlasov all'analisi delle fondazioni delle strutture delle costruzioni idrauliche* », Tesi, 1952.

Dei sette Capitoli del volume i primi sei sono stati scritti da Leont'ev e solo l'ultimo da Vlasov.

L'oggetto di tale volume, in sintesi, è lo studio della deformazione di una struttura elastica, trave, piastra ecc. interagente con un opportuno modello elastico schematizzante la fondazione. Proprio nella caratterizzazione di tale modello ritengo risieda il particolare interesse del volume.

Come è noto, il terreno di fondazione viene usualmente schematizzato, nel calcolo dei cedimenti e nel calcolo degli sforzi indotti dai carichi esterni, come un semispazio elastico. Tale concezione è in effetti sempre alla base dell'indagine del Geotecnico anche se integrata spesso da ulteriori e più precise analisi atte a prendere in conto altri effetti quali la consolidazione, l'anisotropia ecc. In tale volume Vlasov e Leont'ev propongono (Cap. I) delle soluzioni approssimate del problema dell'equilibrio elastico del semispazio o del semipiano, a seconda che si consideri il problema tridimensionale, o il problema bidimensionale più semplicemente.

Il punto di partenza del volume di Vlasov e Leont'ev è il seguente: come

il problema dell'equilibrio elastico di un solido prismatico (trave), o di una piastra piana, o curva, mediante ipotesi cinematiche sufficientemente approssimate si traduce in una trattazione matematica semplice di grande utilità all'ingegnere, così, nell'ambito dello studio dell'equilibrio elastico del semispazio o di uno strato caratterizzante la fondazione, devono sussistere delle analoghe e opportune ipotesi cinematiche semplificative. Nello studio dell'equilibrio elastico di un solido prismatico in cui le dimensioni della sezione trasversale sono piccole rispetto alla lunghezza o , ad esempio, nello studio dell'equilibrio elastico di una piastra di spessore sottile, l'ipotesi della conservazione delle sezioni piane da un lato e quella di conservazione dell'elemento normale dall'altro, permettono di giungere alla soluzione del problema con buona approssimazione e non eccessiva complicazione analitica. In tal modo al corpo elastico reale si sostituisce un corpo elastico ideale, modello teorico di quello effettivo, che presenta delle capacità di deformazione caratteristiche e quindi una sensibilità alla deformazione nei riguardi di certi tipi di distribuzioni di forze, che vengono definite caratteristiche della sollecitazione (momento flettente, sforzo normale ecc.). Ora per uno strato elastico poggiate, ad esempio, su di un piano rigido o per un semispazio elastico quali possono essere quelle ipotesi cinematiche di base che corrispondono, ad esempio, per le travi all'ipotesi di conservazione delle sezioni piane?

In questo volume e precisamente al Cap. I Vlasov e Leont'ev rispondono a tale domanda attraverso la posizione di una successione di ipotesi che si svolge in due tempi e dove nel primo si pone quella più importante e che possiamo definire come il « *principio di verticalità degli spostamenti* ».

Il modello del semispazio elastico soggetto ad azioni verticali, che Vlasov e Leont'ev propongono, ha un regime di spostamenti caratterizzato dall'essere nulli gli spostamenti orizzontali. Gli spostamenti verticali si propagano poi in profondità secondo leggi differenti a seconda della potenza dello strato;

l'equilibrio delle colonne verticali sotto l'azione dei carichi verticali in superficie e delle azioni mutue lungo le pareti verticali viene esaminato attraverso un procedimento variazionale che si rifà al principio dei lavori virtuali.

Si consideri così, ad esempio, nel caso bidimensionale lo strato di piccola potenza illustrato nella fig. 1 poggiate su di un piano rigido.

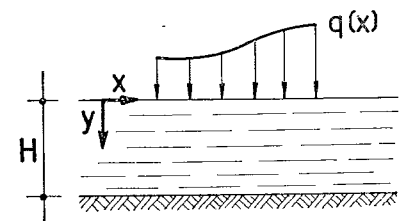


Fig. 1

Le componenti dello spostamento che si assumono sono:

$$\begin{aligned} u(x, y) &= 0 \\ v(x, y) &= V(x) \psi(y) \end{aligned} \quad (1)$$

dove:
$$\psi(y) = \frac{H-y}{H} \quad (2)$$

L'equazione di equilibrio lungo y della generica striscia verticale è costituita da:

$$2t V''(x) - k V(x) + q(x) = 0 \quad (3)$$

dove:

$$t = \frac{E_0}{12(1+\nu_0^2)} \quad k = \frac{E_0}{H(1-\nu_0^2)} \quad (4)$$

$$E_0 = \frac{E}{1-\nu^2} \quad \nu_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (5)$$

se E e ν sono rispettivamente il modulo di elasticità e il coefficiente di Poisson del materiale dello strato.

Corrispondentemente alla (9) si hanno le tensioni:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \frac{E_0}{(1-\nu_0^2)H} V(x) \\ \tau_{xy} &= \frac{E_0}{2(1+\nu_0)} \frac{H-y}{H} V'(x) \end{aligned} \quad (6)$$

Più importante è il caso dello strato di media e grande potenza (fig. 2) caratte-

rizzato, sempre per semplicità nel caso piano, dalle componenti dello spostamento:

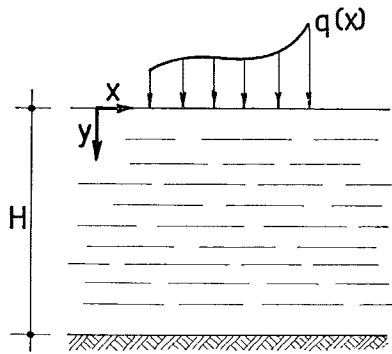


Fig. 2

$$u(x, y) = 0$$

$$v(x, y) = V(x) \frac{\text{sh } \gamma (H - y)}{\text{sh } \gamma H} \quad (7)$$

valido anche al limite per $H \rightarrow \infty$.

L'equazione di equilibrio lungo y porge:

$$2tV''(x) - kV(x) + q(x) = 0 \quad (8)$$

che lega il carico di superficie alla funzione $V(x)$ caratteristica della propagazione lungo l'orizzontale degli spostamenti verticali alle varie quote. Le quantità t e k che figurano nella (8) sono analoghe, salvo leggermente più complesse, alle (4). In modo analogo si tratta il caso, ad esempio, del modello a doppio strato, o dello strato di altezza variabile (fig. 3 e fig. 4).

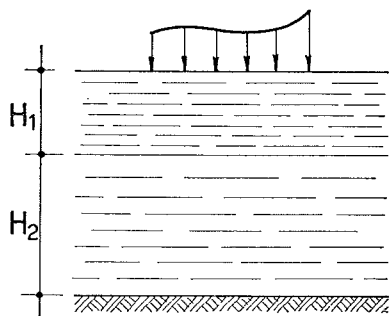


Fig. 3

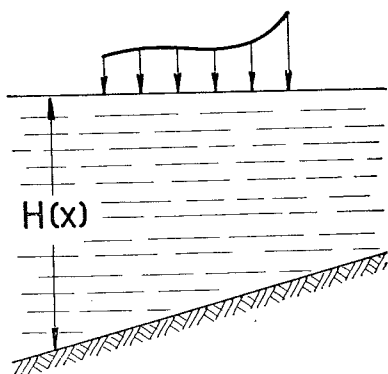


Fig. 4

Analoghe e interessanti trattazioni si hanno per il caso tridimensionale.

La soluzione dei vari problemi particolari si riconduce così alla soluzione delle equazioni differenziali tipo (3) associate a condizioni ai limiti lungo x . Comune è il caso, ad es., dello strato illimitato lungo x .

Numerosi ed interessanti sono i confronti riportati nel volume tra la soluzione esatta alla Boussinesq del semispazio elastico e quelli relativi al modello di Vlasov e Leont'ev.

Ad es. nella fig. 5 è riportato in forma adimensionale il confronto tra gli abbassamenti della superficie del piano orizzontale a quota zero e soggetto al-

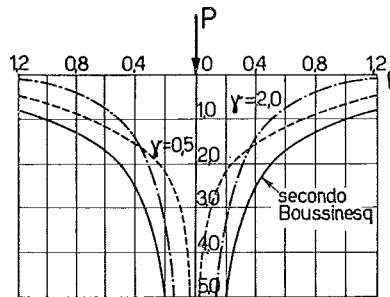


Fig. 5

l'azione di una forza concentrata con quelli relativi al modello tridimensionale dello strato di spessore infinitamente grande per diversi valori della costante γ che figura nella (7).

Quello che è davvero interessante è l'interpretazione delle equazioni tipo (3). Un carico di superficie $q(x)$ è sopportato dal modello da una aliquota tipo Winkler ed una del tipo dell'azione di sostentamento esercitata da una fune (nel caso monodimensionale) o da una membrana (nel caso bidimensionale) in tensione (fig. 6).

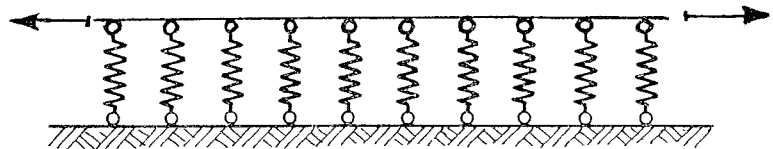


Fig. 6

Affiora così il modello della superficie media del piano di fondazione di PASTERNAK⁽¹⁾ o di FILONENKO-BORODICH⁽²⁾

(1) PASTERNAK P. L., *Fundamentals of a new method of analyzing structures on elastic foundations by means of two foundation moduli*. Moskva-Leningrad Gosudarstvenual 12 datel' stvo litera. po straitel, stvu i arkhitekture, 1954.

(2) FILONENKO-BORODICH M. M., *A very simple model of an elastic foundation capable of spreading the load*. Sbornik trudov Moskovskogo elektr. inst. inzh. transh., No. 53. Tranzheldorizdat 1945.

Ma quello che è importante è che con questa impostazione, a differenza di quelle prima citate, è possibile il collegamento tra le costanti del modello (tensione nella fune o nella membrana, reattività del letto elastico alla Winkler) e le caratteristiche elastiche del terreno di fondazione e la geometria dello strato.

Prima di procedere all'esame delle altre parti del volume è forse conveniente soffermarsi ancora su una analisi critica di tale impostazione che ritengo essere di grande importanza applicativa e che forse, nel volume stesso, andrebbe più a fondo esaminata.

Allo stato attuale, al livello della normale pratica di progettazione, sussiste infatti un « gap » tra la visione e l'impostazione del geotecnico da un lato e quella dello strutturista dall'altro e nella verifica della fondazione e nel calcolo e progettazione della struttura.

Come è noto, gli obiettivi del Geotecnico nella verifica della fondazione sono essenzialmente:

a) la verifica a rottura del piano di fondazione in modo da premunirsi nei confronti della struttura al fine di premunirsi, mediante l'adozione di un opportuno coefficiente di sicurezza, dal dissesto del terreno di fondazione;

b) il calcolo dei cedimenti della fondazione in modo da premunirsi nei confronti di cedimenti eccessivi per la funzionalità e sicurezza dell'opera.

Per lo sviluppo della verifica al punto a) è in effetti inutile la ricerca sofisticata delle interazioni tra struttura di fondazione e relativo piano di posa e, nella pratica tecnica, le azioni esercitate dalle strutture di fondazione vengono prese nel loro complesso,

e si assegnano le più semplici distribuzioni di pressione sul terreno (distribuzione uniforme).

Per lo sviluppo della verifica b) in una prima fase, si determina, entro opportuni limiti di approssimazione, la distribuzione delle tensioni nella fondazione. Si adoperano a tal fine soluzioni già note che si rifanno alla teoria della Elasticità in quanto il terreno di fondazione viene schematizzato in un semispazio elastico. Gioca molto poco, comunque, la caratterizzazio-

no delle costanti elastiche del terreno di fondazione in quanto anche nel caso tridimensionale non interviene in genere il modulo di elasticità. È evidente, che ove si tratti di terreno stratificato, di caratteristiche sostanzialmente variabili, la schematizzazione di un continuo omogeneo viene meno e sostituendo ad esso un continuo elastico con strati di caratteristiche elastiche differenti la distribuzione tensionale può essere più realistica e differente da quella che corrisponde al semispazio omogeneo.

Successivamente il calcolo dei cedimenti dello strato superficiale si persegue per integrazione della contrazione in verticale ϵ_z lungo la verticale stessa.

L'approssimazione di uso corrente è nella valutazione della ϵ_z solo attraverso l'influenza della tensione in verticale σ_z , approssimazione in parte controilanciata dalla sostituzione del modulo elastico effettivo con quello calcolabile in laboratorio direttamente mediante la prova edometrica. C'è, quindi, nella schematizzazione della fondazione da parte del Geotecnico, la visione di una cinematica semplificata del semispazio in cui gli spostamenti verticali sono preponderanti e approssimativamente le colonne verticali di terreno si deformano per effetto della sola componente verticale di tensione. Ognuna di tali colonne si accorcia contrastata lateralmente dal terreno circostante e si ritrova in una situazione che non è molto discosta da quella che corrisponde alla prova edometrica. Tale impostazione conduce, nella valutazione dei cedimenti del piano di posa, a valori generalmente accettabili nella pratica tecnica, salvo ovviamente a tener conto, quando necessario, di altri fenomeni quali in particolare il consolidamento.

Tale modo di operare, sia pure con le dovute approssimazioni è coerente nella sua impostazione.

Il Geotecnico quindi è sovente in grado di valutare ai fini tecnici realisticamente il comportamento del terreno di fondazione attraverso semplici schematizzazioni della cinematica della deformazione di un mezzo continuo di cui è in grado di valutare, entro approssimazioni abbastanza accettabili, le caratteristiche meccaniche.

D'altra parte il Geotecnico lascia sostanzialmente aperto il problema della valutazione della interazione tra il piano di fondazione e relativa struttura di fondazione, indeterminazione che se non è di rilevante influenza per

lo studio del terreno è invece molto rilevante ai fini del calcolo e progettazione della struttura di fondazione stessa.

La caratterizzazione di tali interazioni si presenta come un problema di notevole difficoltà in quanto mentre, dalle considerazioni svolte, sembra opportuno studiare la struttura poggiate su un semispazio elastico, l'adozione di tale schema crea, almeno nella pratica tecnica, difficoltà analitiche non facilmente superabili. Non mancano tentativi particolarmente all'estero (Germania) di standardizzare entro questo schema il calcolo delle travi e piastre di fondazione ma attualmente nella pratica tecnica si preferiscono altre schematizzazioni molto più semplici che generalmente sono adoperate senza un concreto collegamento alle reali caratteristiche del terreno. Infatti attraverso l'usuale modello di Winkler viene a caratterizzarsi una teoria della trave su mezzo elastico che si presenta in effetti staccata dalla realtà.

L'ipotesi di Winkler conduce alla schematizzazione del terreno di fondazione con un liquido di elevatissimo peso specifico che elimina completamente la coesione del terreno e l'influenza delle caratteristiche della fondazione (stratificazione, differenti potenze degli strati ecc.). Inoltre la costante di sottofondo viene assunta nei calcoli con criteri del tutto discutibili che si basano su una classificazione grossolana dei tipi di terreni superficiali.

Lo stesso Geotecnico in effetti non è in grado di assegnare un valore attendibile alla costante di sottofondo in quanto questa deriva da una schematizzazione troppo spinta.

Tale impostazione così approssimata è comunque di uso molto diffuso e sovente vengono sviluppate lunghe e sofisticate calcolazioni delle strutture (graticci di travi con collaborazione torsionale, piastre ecc.) che hanno alla base delle ipotesi di dubbia validità in concreto.

Nel tentativo di ovviare a questa carenza si sono sviluppati degli studi atti a formulare dei modelli dello strato superficiale più vicini nel loro regime cinematico al caso reale. Ci si riferisce in particolare a tutti quei lavori svolti nel filone degli studi di WIEGHARDT ecc.

Lo strato superficiale di fondazione non deve perciò schematizzarsi come un letto di molle indipendenti ma collegate tra loro.

Un collegamento molto semplice è

quello che schematizza lo strato superficiale come una fune tesa su mezzo elastico alla Winkler, nel caso bidimensionale, ovvero come una membrana tesa su molle elastiche nel caso tridimensionale.

La tensione nella fune o nella membrana in un certo qual modo vuole rappresentare la coesione del terreno; in altri studi a tali schemi ne sono stati sovrapposti altri con caratteristiche più o meno uguali.

D'altra parte è anche ovvio che con tale indirizzo di ricerca non si centra il reale problema in concreto in quanto resta del tutto indefinita la caratterizzazione dei parametri del modello (costante elastica delle molle, tensione nella membrana) in funzione delle reali caratteristiche meccaniche e geometriche del terreno di fondazione.

L'impostazione corretta da questo punto di vista in questo volume è invece proprio quella seguita da Vlasov e Leont'ev nella quale da un lato si semplifica, mediante ipotesi fisicamente chiare, il comportamento del semispazio elastico riducendolo ad un opportuno modello, e dall'altra si collegano proprio le caratteristiche del modello alle reali caratteristiche meccaniche e geometriche del terreno di fondazione.

Interessanti sono di conseguenza le trattazioni della trave di fondazione e i relativi confronti con le trattazioni esatte ma molto complesse relative alla trave elastica poggiate nel semispazio elastico.

Alcuni confronti sono riportati al Cap. II e confortano il modello assunto.

Come appare dall'indice del volume nei capitoli successivi al primo si susseguono, uno di seguito l'altro, numerosi problemi di calcolo delle strutture di fondazione, piastre rettangolari, piastre circolari, cupole ecc. Tale casistica sembra però troppo numerosa e sarebbe forse più opportuno ulteriormente approfondire i temi di base che talvolta nel Cap. I sono invece appena accennati o sfiorati. Ad esempio senz'altro interessante sarebbe lo studio del modello che prenda in conto il fenomeno del consolidamento o lo approfondimento del modello a più strati. Carente nei riguardi della reale problematica sembra invece il Cap. VI in quanto la schematizzazione del terreno di fondazione fatta nel Cap. I e applicata, nei capitoli successivi, al calcolo di vari tipi di strutture di fondazione, se sembra essere, con buona approssimazione, aderente al vero per

la determinazione dei cedimenti verticali del piano superficiale soggetto a carichi statici, può senz'altro venir meno nello studio dei fenomeni dinamici. Inoltre contrariamente a quanto sistematicamente svolto nel Cap. VI, in cui si considerano gli effetti di forze pulsanti nel tempo e applicate sulla superficie della fondazione, è senz'altro errato l'ammettere che tutto il terreno, anche quello profondo, vibri in fase con le forze pulsanti applicate in superficie (causa il fenomeno della propagazione d'onda ed i relativi smorzamenti). Il Cap. VII infine riprende più in generale l'impostazione analitica della schematizzazione del continuo in un modello con un numero finito di gradi di libertà lungo direzioni opportune e inquadra il procedimento adoperato al Cap. I nell'ambito dei moderni procedimenti di calcolo delle tensioni e deformazioni nei mezzi continui attraverso processi di discretizzazione.

In conclusione il libro è molto interessante e si colloca con aspetto critico nella moderna problematica del calcolo delle strutture di fondazione portando in tal campo idee più moderne e più aderenti alla concreta visione del Geotecnico.

(Mario Como)

APPENDICE: Indice del volume

CAP. I - *Applicazione del metodo variazionale generale alla teoria delle fondazioni elastiche.*

- 1 Fondamenti del metodo variazionale usato nel ridurre il problema bidimensionale della teoria dell'elasticità a problemi unidimensionali.
- 2 Deformazioni bidimensionali delle fondazioni elastiche.
- 3 Modello piano della fondazione elastica con due costanti caratteristiche.
- 4 Fondazione ad un solo strato con proprietà elastiche variabili.
- 5 Fondazione elastica a due strati.
- 6 Deformazioni tridimensionali di una fondazione elastica.
- 7 Modello tridimensionale di una fondazione elastica con due costanti caratteristiche.
- 8 Tensioni di origine termica in una fondazione elastica.

CAP. II. - *Flessione di una trave su una fondazione elastica.*

- 1 L'equazione differenziale della

flessione di una trave su una fondazione elastica con due costanti caratteristiche.

- 2 Soluzione dell'equazione generalizzata di equilibrio mediante integrali particolari.
- 3 Soluzioni mediante il metodo dei parametri iniziali.
- 4 Trave di lunghezza infinita.
- 5 Trave rigida.
- 6 Trave elastica di lunghezza finita.
- 7 Influenza del carico laterale.
- 8 Trave su fondazione elastica a doppio strato.

CAP. III - *Flessione di una piastra rettangolare su fondazione elastica a un solo strato.*

- 1 Posizione del problema. L'equazione differenziale della flessione di una piastra su fondazione a un solo strato.
- 2 La riduzione del problema della flessione di una piastra su fondazione elastica a quello della soluzione di equazioni differenziali ordinarie.
- 3 Forze interne generalizzate. Condizioni al contorno della piastra.
- 4 Scelta delle funzioni di spostamento. Condizioni al contorno ai bordi longitudinali.
- 5 Scelta delle funzioni di spostamento con il metodo dell'equilibrio statico.
- 6 Piastre semplicemente appoggiate agli estremi.
- 7 Sulla soluzione dell'equazione differenziale della flessione delle piastre di fondazione con il modo dei parametri iniziali.
- 8 Determinazione dei parametri iniziali. Calcolo dei momenti flettenti e degli sforzi taglianti.
- 9 Flessione cilindrica e torsione di una striscia di piastra. Indagine sulla deformazione tridimensionale delle travi.
- 10 Indagine approssimata di una piastra con bordi liberi caricata simmetricamente.
- 11 Esempi
- 12 Il caso generale della piastra con bordo libero.
- 13 Equazioni generali delle piastre spesse su fondazioni a un solo strato.

CAP. IV - *Deformazioni assialsimmetriche delle piastre circolari su*

fondazioni elastiche a un solo strato.

- 1 Posizione del problema. Relazioni di base.
- 2 Integrale generale dell'equazione differenziale per la piastra circolare su fondazione ad un solo strato.
- 3 Piastra infinitamente rigida.
- 4 Piastra anulare.
- 5 Piastra infinita soggetta ad una forza concentrata.
- 6 Piastra elastica di dimensione finita.

CAP. V - *Deformazioni assialsimmetriche di una volta sferica ribassata su fondazione a un solo strato.*

- 1 Equazioni differenziali di base della flessione delle volte sferiche ribassate.
- 2 Equazioni differenziali della flessione di una volta sferica su fondazione elastica.
- 3 Soluzione generale del problema assialsimmetrico.
- 4 Volta sferica di fondazione soggetta a carico uniformemente distribuito.
- 5 Volta sferica di fondazione soggetta a carico sul bordo.
- 6 Indagine approssimata di una volta sferica su fondazione elastica.
- 7 Applicazioni alla cupola rovescia di fondo dei serbatoi cilindrici.

CAP. VI - *Dinamica e stabilità di travi e piastre su fondazione elastica.*

- 1 Equazioni differenziali delle vibrazioni di una trave su fondazione a un solo strato.
- 2 Vibrazioni libere di una trave.
- 3 Effetto di un impulso momentaneo.
- 4 Vibrazioni forzate di una trave di fondazione.
- 5 Studio dinamico mediante discretizzazione in un sistema con un numero finito di gradi di libertà.
- 6 Equazioni differenziali di una piastra su fondazione elastica.
- 7 Indagine approssimata sulle tensioni indotte in una piastra infinita di fondazione soggetta a impatto.
- 8 Piastra con appoggi al contorno.
- 9 Vibrazioni di una piastra con bordo libero.

- 10 Instabilità di una piastra rettangolare poggiante su fondazione elastica e compressa lungo una direzione.
 - 11 Instabilità di una striscia di piastra poggiante su una fondazione elastica.
 - 12 Instabilità di una piastra precompressa poggiante su fondazione elastica.
- CAP. VII - *Il metodo delle funzioni iniziali. Applicazioni del metodo alla teoria delle piastre spesse e alla teoria delle fondazioni elastiche.*
- 1 Soluzione generale del problema tridimensionale della teoria della elasticità.
 - 2 Sulla soluzione delle equazioni della teoria della elasticità con il metodo delle funzioni iniziali.
 - 3 Proprietà di base delle matrici di trasformazione nel metodo delle funzioni iniziali.
 - 4 Metodo generale di riduzione del problema tridimensionale della teoria della elasticità a un problema bidimensionale.
 - 5 Piastra spessa soggetta a un carico simmetrico rispetto al piano medio.
 - 6 Piastra spessa soggetta a un carico emisimmetrico rispetto al piano medio.
 - 7 Deformazione di una fondazione elastica dovuta a un carico applicato sulla superficie.
 - 8 Contatto tra una piastra e una fondazione elastica.
 - 9 Teoria delle piastre e volte di spessore variabile soggette a carichi di superficie generici.
 - 10 Soluzione generale del problema bidimensionale della teoria dell'elasticità.
 - 11 Flessione di una piastra spessa nel caso della deformazione piana. Soluzione approssimata.
 - 12 Uso delle serie trigonometriche nella soluzione del problema bidimensionale.
 - 13 Soluzione esatta per la striscia rettangolare con condizioni arbitrarie di contorno ai bordi longitudinali e condizioni omogenee ai bordi laterali.
 - 14 Altre condizioni al contorno laterale di tipo misto per la striscia.
 - 15 Problemi tri/ e bidimensionali delle piastre spesse a molti strati.
 - 16 Fondazione elastica a molti strati.

Il costipamento delle sabbie con rulli vibranti.

D. J. D'APPOLONIA, R. V. WHITMAN, E. D'APPOLONIA: *Sand compaction with vibratory rollers*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proc. A.S.C.E., vol. 95, SMI, gennaio 1969.

La ricerca di soddisfacenti soluzioni tecnico-economiche per le fondazioni di importanti strutture e per la costruzione dei grandi rilevati porta a considerare oggi sempre più frequentemente la possibilità di migliorare le caratteristiche dei terreni, riducendone la porosità con l'impiego di un mezzo meccanico. Nel caso dei materiali granulari i processi di addensamento più efficaci sono quelli che si basano sulla vibrazione, che può applicarsi in profondità con vari metodi, fra i quali ha avuto recentemente larga diffusione la vibroflottazione.

Tali metodi sono spesso, tuttavia, molto costosi; si avverte, quindi, un sempre maggiore interesse nello impiego di più economici processi di addensamento, ad esempio, operando dalla superficie con i rulli, che si impiegano comunemente per la posa in opera delle terre.

A tale proposito si pone però il problema di stabilire fino a quale profondità risulti efficace l'azione dei rulli vibranti e quali siano le modalità d'impiego di tali macchinari ai fini di ottenere il massimo effetto di addensamento del terreno.

Con le pur pregevoli ricerche teoriche e sperimentali già compiute sull'argomento non si è ancora riusciti a chiarire del tutto la meccanica del processo di addensamento delle sabbie sotto l'azione dei rulli, nonchè l'influenza dei vari parametri che intervengono per una appropriata scelta del mezzo di costipamento e delle modalità del suo impiego. Tra questi si citano le dimensioni ed il peso del rullo, la frequenza della vibrazione, la velocità di avanzamento, il numero delle passate, nonchè lo spessore e le caratteristiche del materiale, quali la composizione granulometrica ed il contenuto d'acqua.

Nella memoria, che qui si riassume, sono esposti i risultati di un'ampia ricerca sperimentale — frutto della collaborazione di tre ben noti specialisti americani di dinamica dei terreni — nella quale si considera l'effetto di alcuni fra i più importanti fattori, innanzi citati, su di una sabbia di duna con dimensione media dei grani pari

a 0,18 mm e coefficiente di uniformità 1,5.

Nelle esperienze sono stati impiegati due rulli lisci, trainati alla velocità di 0,6 m/sec, con le seguenti caratteristiche:

rullo	peso ton	diametro cm	larghezza cm
R1	12,5	120	190
R2	6,3	110	170

Il costipamento è stato effettuato operando con assegnata frequenza di vibrazione su strati di sabbia asciutta con un determinato numero di passate.

Nel corso delle esperienze sono state misurate le accelerazioni e le tensioni verticali che si destavano per effetto dinamico in vari punti del terreno al disotto del rullo. È stato misurato inoltre il peso dell'unità di volume del materiale a varie profondità prima e dopo il trattamento.

Il piano degli esperimenti, con l'indicazione dei principali fattori sperimentali considerati, risulta dalla tabella seguente:

tipo di rullo	spessore strati cm.	passate n.	frequenza vibrazione hz
R1	240	2	27,5
		5	
		15	
R1	60	45	27,5
		2	
		5	
		15	
R2	240	45	29,5
		8	26
			19

In tutte le esperienze lo spandimento del materiale è stato realizzato con le medesime modalità, raggiungendo un indice di compattezza iniziale di $0,50 \div 0,60$.

In fig. 1 sono riportati in diagramma i risultati delle misure del peso secco dell'unità di volume γ_d in funzione della profondità dal piano di campagna per un unico strato di sabbia dello spessore di cm 240 costipato con un variabile numero di passate dal rullo R1.

Si osserva che per un assegnato numero di passaggi, il γ_d cresce al crescere della profondità fino a raggiungere un massimo e poi diminuisce. Al crescere del numero delle passate l'effetto di costipamento aumenta e si fa risentire a profondità sempre più ele-