

Carichi dinamici

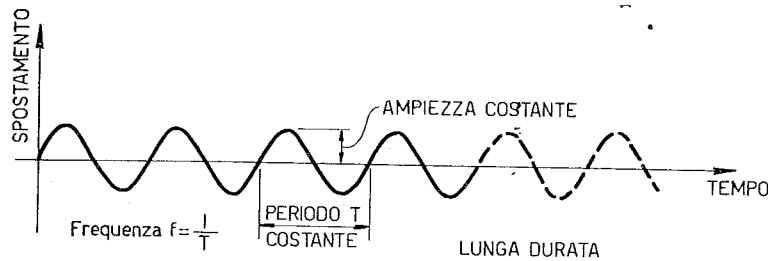
E. D'APPOLONIA - *Dynamic loadings*.
Journal of The Soil Mechanics and
Foundations Division, A.S.C.E., Vol. 96,
SM 1, gennaio 1970.

stamento in funzione del tempo. In
fig. 1 sono rappresentati, a titolo di
esempio, i diagrammi di una delle tre
componenti dello spostamento di un
punto della superficie del terreno. Nel
caso 1 a) di tratta di un moto perio-

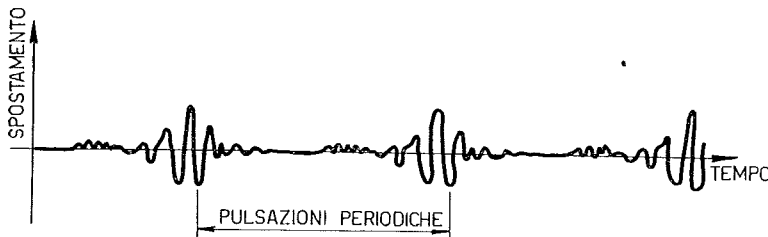
dico con frequenza $f = \frac{1}{T}$ ed ampiez-
za A costante. Possono rappresentarsi
con un diagramma di questo tipo gli
spostamenti dovuti a macchine rotanti
e simili. Anche nel caso 1 b) il movi-
mento si riproduce ad intervalli rego-
lari di tempo, ma è caratterizzato da
ampiezza e periodo variabili, come ac-
cade, ad esempio, per effetto dell'infis-
sione di pali nel terreno. Un'esplor-
sione produce, infine, come in fig. 1 c),
un diagramma di periodo variabile e
di ampiezza più o meno rapidamente
decrescente nel tempo.

I movimenti del terreno prodotti dai
terremoti sono i più complessi che
possono presentarsi all'ingegnere; essi
sono molto diversi da caso a caso e
non sono caratterizzabili da una legge.
Nella fig. 2 è rappresentata, a titolo
di esempio, la componente nord sud
dello spostamento di un punto della
superficie del suolo in occasione del
terremoto di El Centro, in California,
nel 1940.

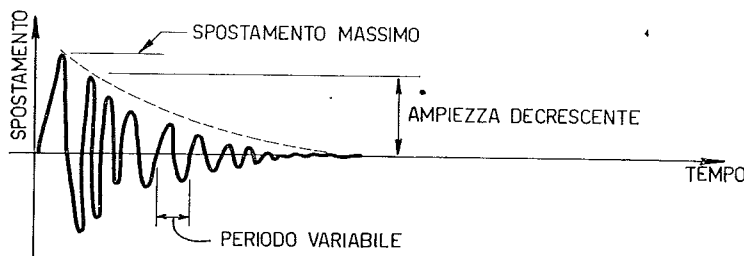
Per valutare le conseguenze che un
movimento del terreno può avere sulle
strutture è necessario conoscere anche
le componenti della velocità e dell'ac-
celerazione. In pratica si misura una
delle tre grandezze, spostamento, ve-
locità, accelerazione, e le altre si rica-
vano per integrazione o derivazione.
Nella citata fig. 2 sono indicati, ac-
canto a quello dello spostamento, i
diagrammi di una componente della
velocità e dell'accelerazione nel punto
considerato, nonché i valori massimi
raggiunti da queste grandezze nel ter-
remoto di El Centro.



(a) Moto periodico: vibrazioni di macchine



(b) Moto periodico: vibrazioni per infissione di pali



(c) Scossa: vibrazioni da esplosioni

Fig. 1. - Tipici movimenti del suolo.

Un problema di meccanica dei ter-
reni diviene *dinamico* quando i ca-
richi applicati variano tanto rapida-
mente che le forze d'inerzia relative
alle masse della fondazione e del ter-
reno, che si pongono in movimento,
non possono più trascurarsi rispetto
alle forze statiche.

In laboratorio, dove le masse sono
molto piccole, le forze d'inerzia diven-
gono significative quando la frequenza
supera all'incirca i 25 hz; nel caso di
una grande diga di terra il problema
dinamico si pone in generale anche
se la frequenza non supera 0,5 hz.

I tipi di movimento che possono aver
luogo nel terreno sono molto diversi
per la grande varietà delle cause che
li provocano. Per caratterizzare il mo-
vimento in un punto generico del ter-
reno è necessario conoscere almeno
l'andamento delle componenti dello spo-

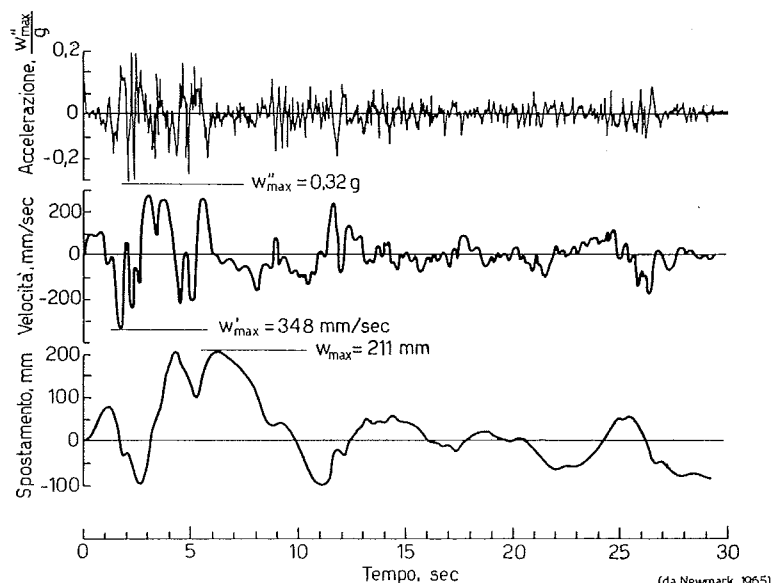


Fig. 2. - Componenti nord sud dello spostamento, della velocità e dell'accelerazione di un punto della superficie del suolo nel violento terremoto verificatosi a El Centro, in California, il 18 maggio 1940.

Un altro dato importante per caratterizzare un movimento del terreno è la durata; le conseguenze di un certo tipo di movimento sulle opere di ingegneria possono, infatti, essere molto diverse secondo che si tratti di un fenomeno di breve durata ovvero di un moto periodico indefinito.

Se, per semplicità, si fa riferimento ad un moto periodico, lo spostamento w può rappresentarsi in funzione del tempo con l'espressione:

$$w = A \sin 2 \pi f t$$

La velocità e l'accelerazione si scrivono allora:

$$w' = 2 \pi A f \cos 2 \pi f t$$

$$w'' = -4 \pi^2 A f^2 \sin 2 \pi f t$$

I valori massimi delle tre grandezze sono, rispettivamente:

$$w_{\max} = A; w'_{\max} = 2 \pi A f; w''_{\max} = 4 \pi^2 A f^2$$

Per caratterizzare un moto periodico ai fini che qui interessano è necessario assegnare la frequenza f e lo spostamento massimo o ampiezza A ; se ne possono dedurre la velocità massima w'_{\max} e l'accelerazione massima w''_{\max} .

Nel caso più generale di moto non periodico, in cui non valgono le semplici formule precedenti, per caratterizzare il movimento è necessario assegnare caso per caso opportuni valori alle grandezze f , A , w'_{\max} , w''_{\max} , nonché alla durata D .

Sulla base di queste cinque grandezze caratteristiche, E. D'APPOLONIA che può considerarsi oggi uno dei maggiori specialisti nel settore della dinamica dei terreni, propone la seguente classifica dei possibili tipi di movimento della superficie limite del terreno:

Per stabilire criteri di sicurezza delle opere di ingegneria nei riguardi di danni per moti del terreno si procede di regola, fissando, per alcune delle grandezze innanzi definite, dei valori limiti, di cui si tiene conto nel calcolo delle strutture. Nella fig. 3 sono riassunti, ad esempio, i criteri stabiliti dalle norme tedesche ed americane, che, per una determinata frequenza f , fissano i valori limiti di A , w'_{\max} e w''_{\max} .

Per verificare l'attendibilità di tali criteri l'A. ha esaminato una serie di casi concreti in cui erano disponibili la frequenza, nonché i valori effettivamente raggiunti dall'accelerazione massima del moto: in ognuno di tali casi era noto inoltre il comportamento delle opere.

Questi dati, riassunti in fig. 4, sono particolarmente istruttivi, perché dimostrano che il criterio di sicurezza

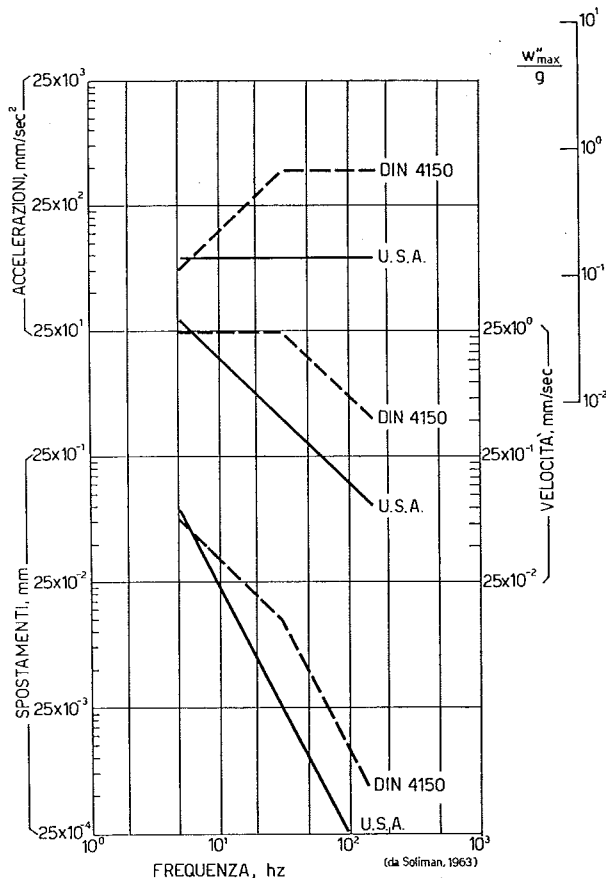


Fig. 3. - Limiti di sicurezza per le vibrazioni degli edifici secondo le norme tedesche DIN ed i criteri comunemente adottati negli Stati Uniti.

grandezze caratteristiche			moti periodici (1)	scosse (2)	moti casuali (3)
frequenza	f	hz	> 1	> 1	< 10
ampiezza	w_{\max}	mm	< 2,5	< 25	> 25
velocità max	w'_{\max}	mm/sec	< 25	> 25	> 25
accelerazione max	w''_{\max}	mm/sec ²	< 0,1	> 0,1	< 0,1
durata	D	sec	> 10	< 1	> 1

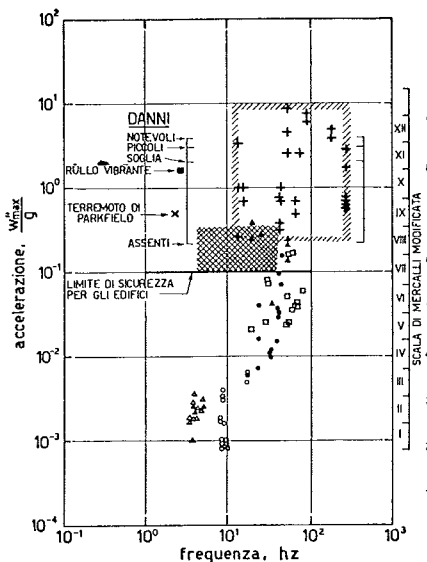
(1) Macchinari, escavatori, infissione di pali, traffico aereo ed automobilistico, azione del vento e del moto ondoso.

(2) Esplosioni, martelli demolitori, traffico aereo, terremoti.

(3) Esplosioni, terremoti.

basato sulla limitazione della sola accelerazione, senza tener conto, ad esempio, della natura dei terreni, fornisce risultati che a volte sono troppo cautelativi ed a volte ottimistici.

L'A. passa quindi a considerare più in concreto i problemi dinamici che si presentano per le fondazioni superficiali e ricorda, innanzitutto, i metodi che sono stati recentemente messi a punto per il calcolo degli spostamenti dinamici con la teoria del semispazio omogeneo, elastico ed isotropo. Le corrispondenti soluzioni finora disponibili sono, tuttavia, limitate a qualche caso particolare. Più comunemente il problema viene risolto facendo ricorso ai modelli matematici tipo *lumped*, oggi



CASO	SIMBOLO	TERRENO	CAUSA	TIPO DI MOVIMENTO DEL SUOLO	DISSISTI OVVERO SCOPO
1	o	SABBIA FINA COMPATTA	COMPRESSORI DA 3000 HP	PERIODICO CON AMPIEZZA E FREQUENZA ALL'INCIRCA COSTANTI	ECESSIVA VIBRAZIONE DELLE MEMBRATURE DI SOSTEGNO
2	Δ	SABBIA E GHIAIA GROSSA MEDAM. COMP.	ELEVATORI DA 100 E 200 t IN UNA FONDERIA	PERIODICO CON AMPIEZZA E FREQUENZA VARIABILI	ECESSIVI CEDIMENTI DELLE FONDAZIONI DURANTE 30 ANNI
3	□	SABBIA FINA COMPATTA	ELEVATORI DA 100 t IN UN LAMINATOIO	PERIODICO CON AMPIEZZA E FREQUENZA VARIABILI	ECESSIVA VIBRAZIONE DELLE CAPRIATE E DI ALTRE MEMBRATURE PORTANTI
4	•	SABBIA FINA COMPATTA	VIBRATORE PER AUTO DA 5 t SU PLINTI	PERIODICO CON AMPIEZZA E FREQUENZA COSTANTI	PROVA PER DETERMINARE IL CEDIMENTO DELLE FONDAZIONI
5	▲	SABBIA FINA COMPATTA	CADUTA DI UN SOLAIO DI 15 t DALL'ALTEZZA DI cm 75	SCOSSA	PROVA PER DETERMINARE IL CEDIMENTO DELLE FONDAZIONI
6	■	SABBIA FINA SCIOLTA	RULLO VIBRANTE DA 6 t MASSIMA ACCELERAZIONE VERTICALE A m 1 SOTTO LA SUPERFICIE DEL SUOLO	SCOSSA PRECEDUTA E SEGUITA DA MOVIMENTO PERIODICO CON AMPIEZZA DECRESCENTE E FREQUENZA COSTANTE	ADDENSAMENTO
7*	+	ROCCIA LAPOEA	ESPLOSIVI	SCOSSA	DEMOLIZIONE
8	x	---	TERREMOTO DI PARKFIELD 27 GIUGNO 1956	SCOSSA	---
9	⊗	---	INTERVALLO DELLE MASSIME ACCELERAZIONI E FREQUENZE NEL TERREMOTO DI EL CENTRO, 18 MAGGIO 1940	SCOSSA VIOLENTA	---

* (da Edwards e Northwood, 1960)

Fig. 4. - Rappresentazione dei valori dell'accelerazione massima del suolo in funzione della frequenza per effetto di macchinari, elevatori, esplosioni, rulli per il costipamento e terremoti.

molto perfezionati, in cui al complesso fondazione-terreno si sostituiscono modelli reologici più o meno complicati. Con questi modelli si schematizza il tipo di movimento periodico, ad es. traslazione orizzontale o verticale ovvero rotazione intorno ad asse verticale, ed il comportamento del terreno (elastico, elasto-plastico, viscoso, etc.), nonché l'effetto di smorzamento dovuto a varie cause.

Alle costanti reologiche non occorre assegnare un particolare significato fisico: è sufficiente sceglierne i valori con la condizione di ottenere dal sistema *lumped* la *risposta dinamica* che meglio interpreta i risultati di esperienze in sito o in laboratorio.

Oltre al problema del calcolo degli spostamenti dinamici, se ne presentano in pratica almeno altri due che sono tipici dei terreni incoerenti: il problema dei *cedimenti permanenti*, che si verificano per effetto delle vibrazioni e quello della *liquefazione*. In molti casi, infine, è necessario tener conto delle variazioni che le caratteristiche meccaniche del terreno subiscono sotto l'azione di carichi ripetuti.

L'addensamento del materiale si verifica per l'effetto combinato delle accelerazioni e delle sollecitazioni dinamiche impresse ai granelli. Per valutare i cedimenti permanenti che ne conseguono occorrerebbe studiare il fenomeno, riproducendo le accelerazioni e lo stato tensionale dinamico, che si destano in un punto generico del materiale per effetto della sollecitazione esterna. Finora non è stato possi-

bile, tuttavia, tener conto nella sferimentazione ad un tempo dell'uno e dell'altro dei due fattori menzionati. E' stato necessario, quindi, separarne gli effetti, eseguendo:

A) *prove ad accelerazioni controllate*, nel corso delle quali si fa variare l'accelerazione mentre le tensioni dinamiche sono tenute a livelli molto bassi;

B) *prove a tensioni dinamiche controllate*, nelle quali si fanno variare le tensioni dinamiche con bassa frequenza, in modo tale che le accelerazioni indotte nel materiale siano molto piccole.

A titolo di esempio l'A. riporta i risultati di prove del tipo A eseguite sottoponendo un campione di sabbia a vibrazione in direzione verticale e con accelerazione crescente per differenti valori dell'ampiezza. Risulta che l'effetto di addensamento del materiale diviene sensibile quando w''_{max} supera l'accelerazione di gravità. L'ampiezza della vibrazione non sembra esercitare influenza apprezzabile.

Se l'esperienza viene eseguita con valori crescenti della pressione applicata l'effetto di addensamento si ottiene solo se l'accelerazione supera un certo valore critico, che è tanto più elevato quanto maggiore è la pressione applicata.

Si osserva qui che il tipo di relazione intercorrente fra la porosità e l'accelerazione può essere anche diverso da quello di fig. 5 se variano le modalità di vibrazione: si consulti a tale proposito la più recente memoria di Youn, [1970] che ha applicato la vi-

brazione, come già Barkan, nel piano orizzontale.

Nelle prove citate dall'A. l'effetto di addensamento provocato dall'accelerazione, se questa resta inferiore a g , deve considerarsi all'incirca nullo. Tuttavia, le forze d'inerzia che si destano, inducono nel materiale uno stato tensionale dinamico; alle pulsazioni di queste tensioni, piuttosto che alle accelerazioni, è da attribuire l'addensa-

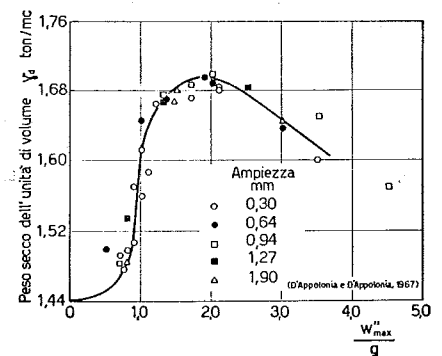


Fig. 5. - Risultati di una prova ad accelerazione controllata eseguita senza l'applicazione di sovraccarico.

mento che si verifica per $w''_{max} < g$.

Risultati di prove del tipo B sono rappresentati con i grafici di fig. 6, dai quali si rilevano le deformazioni di un provino in stato di sollecitazione monodimensionale e sottoposto a sforzi ripetuti con frequenza variabile.

In questo caso l'addensamento è dovuto alle tensioni dinamiche che si destano nel materiale piuttosto che all'accelerazione, il cui valore è molto ridotto. L'effetto cresce al crescere del

livello della sollecitazione dinamica σ_d rispetto a quella statica σ_c .

In dipendenza di questi risultati, si è riconosciuta la necessità di valutare

sposta della fondazione; il modulo di comprimibilità del terreno potrebbe ridursi per l'effetto dell'applicazione di carichi ripetuti di lunga durata, an-

a 10 e nei quali il numero N_{30} dei colpi del penetrometro dinamico è inferiore a 15, il che corrisponde di regola a un $D_r < 0,50$.

Quanto alle caratteristiche dei movimenti del terreno, risulta dall'esperienza che il pericolo della liquefazione è notevole quando l'accelerazione supera all'incirca 0,1 g; anche la durata del movimento ha la sua importanza: la liquefazione può verificarsi, infatti, anche in caso di terremoti di piccola intensità se la durata di questi è notevole.

E' dimostrato, infine, che, al crescere della pressione alla quale il terreno è sottoposto, cresce il numero delle ripetizioni dello sforzo di taglio occorrenti per determinare la rottura per liquefazione.

Da quanto sopra si deduce che, per ridurre il pericolo della liquefazione si potrebbe, in linea di principio, seguire uno dei seguenti criteri:

- addensare il materiale;
- incrementare la pressione applicata;
- cementare i grani.

In pratica, talvolta si asporta il terreno suscettibile di liquefazione e lo si ripone in opera con compattezza più elevata; oppure si addensa il terreno in sito costipando in superficie con piastre o rulli vibranti ovvero in profondità con la vibroflottazione; si installano colonne di sabbia, che esplicano anche una funzione drenante; infine, si procede con le iniezioni.

Nella fig. 7 l'A. fornisce un esempio di miglioramento del terreno di fondazione di un camino a mezzo di colonne di sabbia.

L'A. ricorda, infine, che gli studi più avanzati sulla liquefazione sono stati compiuti da SEED e IDRISS [1967], che hanno fornito anche un primo criterio analitico per la ricerca della profondità, fino alla quale è necessario prevedere un trattamento del terreno al fine di eliminare il pericolo della liquefazione.

L'A. considera in ultimo i problemi connessi con la realizzazione di dighe di terra in zone sismiche. Dopo aver ricordato i più recenti progressi, anche qui in gran parte dovuti a Seed ed ai suoi collaboratori, nel calcolo dinamico di queste strutture, con particolare riferimento alla previsione delle lesioni che possono manifestarsi per effetto di terremoti, l'A. fornisce una serie di raccomandazioni pratiche, che derivano direttamente dalle conoscenze teoriche e sperimentali acquisite negli ultimi anni sulle varie e complesse questioni che sorgono nel

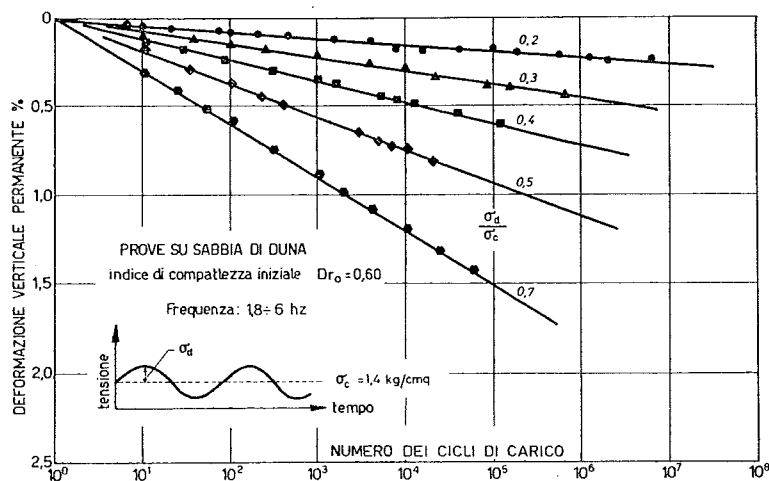


Fig. 6. - Risultati di prove monoassiali a tensioni dinamiche controllate.

caso per caso quale sia il livello delle sollecitazioni dinamiche indotte in un terreno di fondazione sottoposto a vibrazione ed i corrispondenti cedimenti. L'A. cita a questo proposito il lavoro di SPARROW e TORY, [1966] che hanno calcolato tali sollecitazioni con la teoria del semispazio elastico e lo studio da lui medesimo più recentemente condotto a termine per il calcolo dei cedimenti con il metodo dello *stress path* [D'APPOLONIA D. J., D'APPOLONIA E. e BRISSETTE R. F., 1968].

In attesa che questi metodi possano entrare nella pratica corrente, l'A. suggerisce i seguenti valori limiti dell'indice di compattezza per garantire la sicurezza nei riguardi di cedimenti dovuti a movimenti del terreno:

ε mm/mm		D_r
piccola	$10^{-5} \div 10^{-3}$	0,70
media	$10^{-3} \div 10^{-2}$	0,80
elevata	$10^{-2} \div 10^0$	0,90

in cui la ε è la presumibile deformazione del terreno per effetto del movimento.

E' appena il caso di ricordare che il criterio di sicurezza basato sull'imposizione di un valore minimo dell'indice di compattezza del terreno non assicura sempre una soddisfacente ri-

che se la porosità resta approssimativamente costante. Anche su questo argomento, tuttavia, sono disponibili risultati di recenti studi molto pregevoli [DRNEVICH V. P., RICHART F. E., 1970].

L'importanza pratica di una chiara comprensione della meccanica dei fenomeni di vibrazione può desumersi da un interessante esempio fornito dall'A. sul trattamento del terreno di fondazione di macchine vibranti. Dagli studi teorico-sperimentali innanzi richiamati risulta che per un movimento di traslazione, orizzontale o verticale, l'effetto di smorzamento dovuto alla propagazione delle onde supera di gran lunga quello dovuto alla perdita di energia per effetto delle deformazioni che hanno luogo nel terreno; i costosi dispositivi per assorbire l'energia intorno alle fondazioni sono allora del tutto inutili. E' invece opportuno addensare il terreno per creare intorno alla fondazione una sorta di anello più rigido, che, al limite, può considerarsi solidale con la fondazione e che certamente accresce la capacità di smorzamento del sistema.

Passando a considerare il problema della liquefazione, dopo aver ricordato i classici studi di CASAGRANDE, quelli recentissimi di SEED e dei suoi collaboratori, nonché le esperienze dei giapponesi, l'A. conferma che i terreni più suscettibili alla liquefazione sono i depositi di sabbie fini con grado di uniformità compreso fra 2 e 5, con percentuale $d < 0,07$ mm non superiore

progetto di queste strutture in zone sismiche.

Con riferimento alla sezione ideale rappresentata in fig. 8, tali raccoman-

7) prevedere robusti zoccoli per un buon contenimento della sezione della diga;

8) aumentare la pressione di conte-

the Soil Mechanics and Foundations Division, Proc. A.S.C.E., Vol. 94, SM3.

DRNEVICH V. P., RICHART F. E. (1970) - *Dynamic prestraining of dry sand*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proc. A.S.C.E., Vol. 96, SM2.

SEED H. B., IDRIS I. M. (1967) - *Analysis of soil liquefaction: Niigata Earth quake*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proc. A.S.C.E., Vol. 93, SM3.

SPARROW R. W., TORY A. C. (1966) - *Behaviour of a soil mass under dynamic loading*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proc. A.S.C.E., Vol. 92, SM3.

YOUNG T. L. (1970) - *Densification and shear of sand during vibration*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proc. A.S.C.E., Vol. 96, SM3.

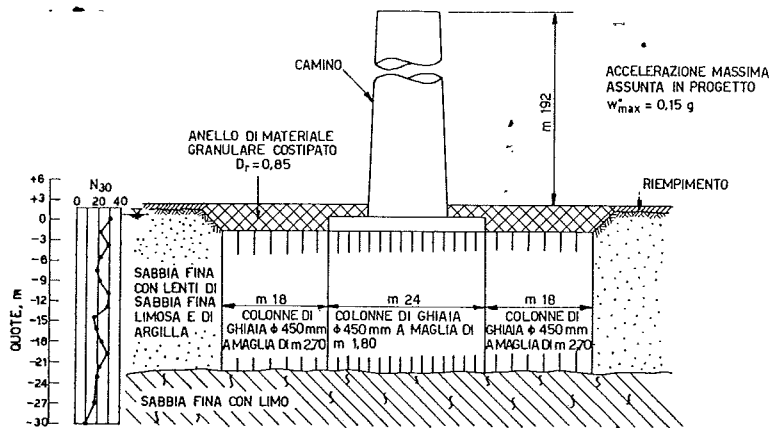


Fig. 7. - Impiego di colonne di ghiaia e di un anello superficiale di materiale costipato per migliorare le caratteristiche del terreno di fondazione di un camino in zona sismica.

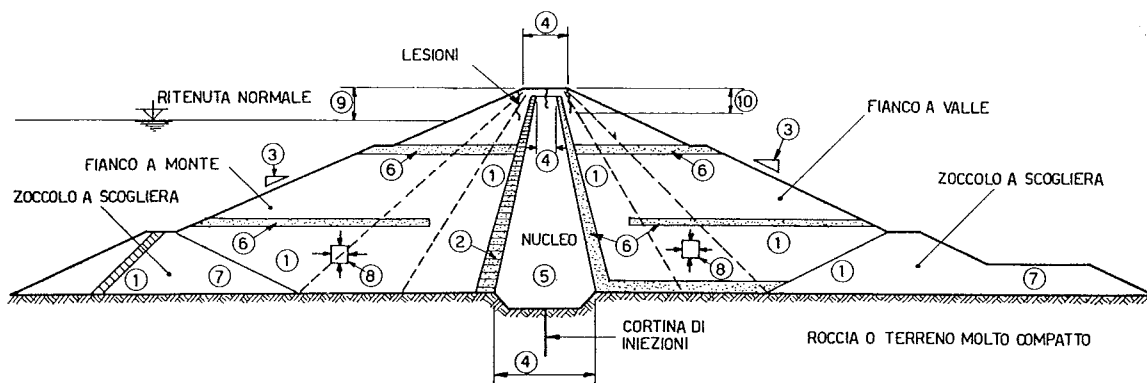


Fig. 8. - Criteri per il progetto e la costruzione delle dighe di terra in zone sismiche. I numeri si riferiscono all'elenco di raccomandazioni riportato nel testo.

dazioni possono elencarsi in sintesi nella seguente decalogo:

1) aumentare il peso dell'unità di volume dei vari materiali di cui l'opera è costituita;

2) aumentare lo spessore delle zone di transizione ed impiegare materiali che siano poco suscettibili al lesionamento;

3) ridurre le scarpe dei paramenti;

4) allargare il coronamento e dare maggiore spessore al nucleo, evitando le soluzioni con nucleo inclinato;

5) ridurre le pressioni neutre di costruzione, costipando con un contenuto d'acqua inferiore al contenuto ottimo;

6) disporre drenaggi verticali ed orizzontali;

nimento laterale, costipando il materiale con rulli vibranti;

9) aumentare il franco nei riguardi della tracimazione;

10) verificare che la profondità delle lesioni stimata in base alle caratteristiche del terremoto tipo posto a base del progetto non raggiunga la quota del livello di ritenuta normale del serbatoio.

(Ruggiero Jappelli)

BIBLIOGRAFIA

D'APPOLONIA D. J., D'APPOLONIA E., BRISSETTE R. F. (1968) - *Settlement of spread footings on sand*. Journal of

Autostrade d'Italia 1970
Italian motorways 1970

L'Industria delle Costruzioni No. 19 / Sett. - Ott. 1970

Al VI° Congresso mondiale della strada, tenutosi a Montreal il 4-10 Ottobre 1970, l'ANCE, Associazione Nazionale Costruttori Edili, ha presentato un numero speciale della sua rivista tecnica, dedicato alle realizzazioni autostradali italiane.

Il volume è stato pubblicato in due edizioni, l'italiana e l'inglese, con tiratura complessiva di oltre ventimila copie ed è dovuto all'Ing. DI PENTA, Consigliere dell'A.G.I. e Presidente del Comitato Lavori Stradali dell'ANCE, ed all'Ing. DE SANTIS redattore della Rivista.

Consta di 340 pagine di testo, riccamente illustrato a colori, e di 186 pa-