

Note tecniche

SULL'ASPETTO SISMICO DEL PROBLEMA STATICO DELLE DIGHE

RIASSUNTO: Si raccolgono alcune notizie relative all'effetto sismico sui manufatti in genere in funzione della lontananza dall'area epicentrale e della consistenza dei terreni di fondazione; attivazione di faglie e danni alle dighe ed alle opere annesse; onde nei laghi dovute ai terremoti e loro effetti sulle dighe, fluidificazione dei terreni o delle terre sotto lo scuotimento sismico. Si ricorda qualche criterio di calcolo statico delle dighe con le sollecitazioni da considerare. Si richiamano alcuni metodi di indagine della capacità resistente dei terreni di fondazione. Si espongono i criteri progettuali seguiti dai giapponesi (per i lavori in genere e per le dighe in ispecie), le norme italiane (per le dighe) e le norme turche; si richiamano i criteri più recenti introdotti dai russi e i risultati delle indagini su modelli eseguite dai laboratori russi negli ultimi anni.

Si espongono le conclusioni che si possono trarre e, sulla base principalmente delle avvertenze suggerite da AMBRASEYS, si elencano gli accorgimenti più opportuni per la progettazione e per il controllo delle dighe in materiali sciolti nei territori di elevata sismicità.

1. Premessa

La presente è una semplice preliminare schematica messa a punto dell'argomento dei criteri sismici seguiti in alcuni paesi nella progettazione delle dighe e specialmente di quelle in materiali sciolti.

L'aspetto qui considerato è quello riguardante alcune caratteristiche geologiche della località da sbarrare: è l'aspetto geologico, cioè, di un complesso problema tecnico ed, in particolare, geotecnico.

Per quanto si riferisce alle numerose altre caratteristiche geologiche, geografiche e locali da passare preventivamente in rassegna prima di soffermarsi (da parte del progettista) su quelle effettivamente

pregiudiziali nel singolo caso, si rimanda ad un articolo in corso di stampa sul *Giornale del Genio Civile*.

Apposite messe a punto occorrono per chiarire altri punti di vista: ma queste, previo adeguato inquadramento negli ambienti naturali (geologici, geografici ecc.), debbono essere effettuate dai competenti specifici in materia di costruzioni.

E' opportuno avvertire che spesso i tipi delle costruzioni distrutte, in base alle quali si sono determinate le intensità dei terremoti passati, hanno indubbiamente di molto accentuato gli effetti sismici. Tuttavia, per lo più, nelle località prescelte per la costruzione di una diga, l'aspetto sismico si può valutare soltanto in base alla storia sismica della regione, considerata nel suo complesso. L'importanza del lato sismico non è la stessa per tutte le località di una medesima regione: maggiore prudenza occorre nell'apprezzare la sismicità di alcune sezioni dei corsi d'acqua prescelte per lo sbarramento, nelle quali, mancando ogni traccia di costruzioni all'epoca dei passati terremoti (più o meno ripetuti) non risultò manifesto un effetto ad eccezione dei casi di evidenti modifiche della configurazione dei luoghi. E' giocoforza allora procedere per analogie geologiche per fissare il grado di sismicità più ragionevole (che dia cioè sufficiente affidamento, senza esagerare nel margine di sicurezza).

2. Effetti sismici in rapporto alle distanze dall'epicentro

E. ROSENBLUETH (*Relazione al Simposio sul terremoto di Città del Messico del luglio 1957* in « Inge-

niera»; gennaio 1958), a proposito dell'influenza della natura dei terreni, ricorda che dalle ricerche di GUTENBERG, di HOUSNER e dei giapponesi risulta che lontano dall'epicentro l'accelerazione sismica di un terreno sciolto può diventare anche 5 volte quella del substrato lapideo su cui appoggia; per terremoti vicini può diventare anche metà di quella del substrato. Ciò vale specialmente per forti terremoti.

I rapporti fra gli spostamenti sono sempre maggiori di quelli fra le accelerazioni; i rapporti fra le durate superano sempre l'unità.

Comunque, l'amplificazione varia da sisma a sisma e quanto più è elevata, tanto più pronunciata può essere la risonanza parziale per qualche struttura.

3. Faglie con rigetti e dighe

Durante il terremoto di San Francisco del 1906 la faglia di San Andrea attraversò una collinetta formante la spalla sinistra della principale diga della zona. Nella diga non si produsse alcuno spostamento, ma una galleria connessa all'invaso fu tagliata in due ed in parte schiacciata e rigettata per circa m 1,5.

A sud della diga di San Andrea, nella stessa valle, v'era la diga in terra « Upper Crystal Springs » alta circa m 27. La faglia del 1906 tagliò il manufatto diagonalmente producendo uno spostamento relativo di circa m 2,70 (da KRYNINE e JUDD, p. 683, 1957).

Con questo terremoto di San Francisco del 1906 la faglia di San Andrea si aprì su una lunghezza di oltre km 430 parallelamente alla costa del Pacifico (in parte sotto acqua) con rigetto massimo orizzontale di oltre m 6 e verticale di circa cm 90 (da LOUDERBACK, pp. 145, 1950 e da KRYNINE e JUDD, pp. 674, 1957).

Per un elenco delle principali faglie con relativi rigetti (massimi verticali m 14 circa e orizzontali m 6) generatesi in occasione di terremoti, vedi G. D. LOUDERBACK in *Berkey Volume*, pp. 143-145, 1950.

Secondo J. N. JOURDAN (*Geotimes*, 5, n. 5, 1961) con le scosse di Hegben Lake dell'agosto 1959 si rilevarono spostamenti verticali di circa 6 metri.

C. F. RICHTER (1958), parlando dei terremoti della California, accenna al comportamento di una diga in terra costruita col sistema della ripiena idraulica (citando ENGLE, 1936) e rileva, fra l'altro, che la diga di Crystal Springs in ottimo calcestruzzo lontana meno di 275 m dalla faglia attiva non subì danni col terremoto che riattivò la faglia.

4. Onde nei laghi artificiali per effetto del terremoto

E. ROSENBLUETH, trattando del terremoto del Cile del 1960 (*Ingenieria*, 31, gennaio 1961) avverte che nella zona maggiormente colpita non vi erano vere dighe.

Il comportamento di altre opere in dipendenza delle caratteristiche geologiche ed idrogeologiche del suolo conferma le idee sulla rilevante influenza di

queste caratteristiche: specialmente grave il pericolo di fluidificazione del sottosuolo.

Accennando ai laghi artificiali, segnala, oltre il pericolo della fluidificazione delle sponde, anche quello delle ondate dovute a frane: tali ondate potrebbero esercitare spinte troppo forti sulla diga, oltre che provocare tracimazioni.

E' necessario, pertanto, prevedere ampi e robusti *franchi* (per cui vedi anche SUPINO e PENTA, 1957).

5. Fluidificazione del suolo o del materiale costituente la diga

Per il fenomeno della fluidificazione del materiale sciolto ricco di acqua sotto uno scuotimento, per cui le particelle restano momentaneamente sospese ed il materiale tutto si comporta, non più come un solido ricco di acqua, ma come un liquido (sia pure altamente viscoso), vedi K. TERZAGHI (lavori vari e specialmente monografia sulle frane nel *Berkey Volume* del 1950).

Del pericolo presentato sia dal materiale sciolto costituente la diga, sia dal terreno sciolto di fondazione, giustamente si preoccupano molti specialisti, fra cui OTSUKI (1956), ROSENBLUETH (1961), AMBRASEYS ecc.

S. NIWA (*Atti 2° Congresso Internazionale di Ingegneria Sismica*) deduce dai suoi esperimenti che durante un terremoto la *spinta delle terre contro un muro di sostegno* può subire un aumento superiore al 100%. Tale effetto, probabilmente connesso alle *variazioni momentanee dello stato di consistenza* del materiale sciolto ricco di acqua, conferma ancora di più la necessità di verificare la stabilità di una diga e del suo sottosuolo sciolto quando il loro stato di consistenza è suscettibile di variazioni (specialmente nel caso di « argille » tixotropiche) temporanee sotto lo scuotimento sismico.

6. Criteri di calcolo della stabilità sismica delle dighe in materiali sciolti

Secondo alcuni, applicando le prescrizioni costruttive generali per tali tipi di dighe e per le rispettive scarpate, sembra che, per lo più, si raggiunga un così elevato grado di sicurezza che, fra l'altro, restano assorbiti il carico accidentale sismico (p. es. accelerazione orizzontale 0,10 - 0,05 g e accelerazione verticale 0,20 - 0,10 g) e la spinta dinamica contro la diga da parte dell'acqua invasata.

Invece N. N. AMBRASEYS con altri non solo ritiene necessario verificare dal punto di vista dinamico le dighe in materiali sciolti, ma ravvisa anche la necessità di tener conto di molti fattori indicandone i procedimenti di calcolo e risultati di esperienze in proposito.

In particolare, vanno qui ricordate le seguenti sue considerazioni e trattazioni svolte in quattro recenti note, di cui due comparse negli *Atti del 2° Congresso Internazionale di Ingegneria Sismica* (1960), una sul *Journ. of Geoph. Research* (65, 1960) ed una nel *VDI Zt* (102, n 26, pp. 1241-3, 1960).

— Necessità di tener conto della flessibilità delle dighe in materiali sciolti sotto l'azione sismica.

— Ragioni (periodi delle oscillazioni sismiche) per le quali tali dighe possono comportarsi sia come corpi rigidi (ma con frane e scoscendimenti nel caso di T piccoli), che come corpi elastici (che vibrano con T grandi).

— Modalità per calcolare la diga, tenendo conto della flessibilità lungo l'altezza.

— Necessità di aumentare il coefficiente sismico (k) partendo dalla base verso la cresta (come fanno i russi).

— Rapporti fra periodo del terremoto, distanze dall'epicentro ecc. ed effetto sismico (frane superficiali, crolli, tagli ecc.).

— Calcolo di T , τ ed ϵ di un sottosuolo sciolto tabulare che riceve una serie di impulsi sismici dal substrato lapideo (che trasmette la scossa originale) ed è caricato da un altro corpo (rigido, cui si può in prima approssimazione paragonare una diga).

— Dipendenza dell'effetto sismico su una diga dal periodo proprio di questa, che si deve considerare come un oscillatore elastico.

— Calcolo del periodo (T) della diga schematizzata (in un prisma triangolare o trapezoidale con la base maggiore in basso e supposta di una certa lunghezza rispetto all'altezza).

— Calcolo delle deformazioni.

— L'azione sismica sulla base della diga, che s'accenna nelle sue parti più alte, deriva da quella trasmessa dal sottosuolo sciolto, il quale, a sua volta, modifica l'azione proveniente dal substrato lapideo.

— Poco influiscono le inclinazioni delle scarpate sulla durata delle oscillazioni in una diga in terra a sezione trapezia nella quale il rapporto fra lunghezza ed altezza si mantenga entro certi limiti.

7. Sollecitazioni da considerare nella progettazione delle dighe (e di ogni altro manufatto in genere) in regioni sismiche

E' noto che, pur continuandosi per ragioni pratiche a sostituire l'azione dinamica del terremoto con una sollecitazione statica, che si presume equivalente e che si esprime come frazione dell'accelerazione di gravità, da ogni parte vi è la tendenza a svincolarsi da questo metodo approssimato per tener meglio conto del carattere dinamico dell'azione sismica. Si parla perciò di *metodi statici* e di *metodi dinamici*.

In alcuni paesi qualche concreto passo in proposito è stato realizzato. Sul contrasto delle idee una buona messa a punto si deve sia a ENGLE, che a RICHTER.

H. H. ENGLE (*Bull. Soc. Sism. d'Am.*, 43, pp. 233-7, 1953) è dell'idea che convenga imporre il metodo statico per edifici con meno di 10 piani e che agli edifici più alti o alle altre opere di altezze o di carattere straordinario possa applicarsi il metodo dinamico.

C. F. RICHTER (nel suo trattato di *Sismologia*, 1958), pur rilevando un'empiricità troppo accentuata e talora la poca economicità delle opere costruite

basandosi sul metodo statico, riconosce che tale metodo ha risposto bene negli edifici comuni bene costruiti, anche in occasione di terremoti forti.

Riporta il parere in proposito di G. W. HOUSNER che, pur riconoscendone i difetti, ritiene che i metodi statici sono soltanto approssimati e debbono essere perfezionati.

Circa i tipi di sollecitazione, per lo più i calcolatori si limitano a verificare la stabilità dei manufatti al solo taglio. Non pochi studiosi ritengono necessario considerare anche flessione, compressione, trazione e torsione (v. per es. ROSENBLUETH, per il terremoto del Cile e per quello di Città del Messico e OTSUKI negli *Atti del 1° Congr. Int. di Ing. Sism.*, 1956).

S. W. MATTEWS in *The National Geographic Magazine* (Washington, n. 117, marzo 1960, pag. 392-59, sec. una recensione nel n. 37 della *Revue pour l'étude des calamités* pag. 98, 1961), parlando del terremoto del Montana del 17-VIII-1959, ricorda che la Hebgen dam, una grande diga nel Montana, si lesionò, ma non venne meno alla funzione di ritenuta (di un lago artificiale di 15 km di lunghezza).

8. Metodi consigliabili per la determinazione delle caratteristiche del terreno direttamente impegnato dal manufatto

Oltre le consuete indagini classiche (sondaggi, pozzi accessibili, prove in situ con martinetti, compressione con acqua tramite corpi impermeabili, prove geotecniche varie e prove di laboratorio su campioni estratti con ogni precauzione, ecc.), dati molto utili possono trarsi sulle caratteristiche meccaniche (statiche e dinamiche) del suolo e del sottosuolo mediante il rilievo della velocità di propagazione delle onde elastiche generate con esplosioni. Tali prove, anche se utilizzabili soltanto per confronto, permettono di giudicare il comportamento elastico di vaste masse nel loro assieme senza, cioè, il pericolo di complicazioni dovute a particolari locali o, addirittura, al fatto stesso di aver eseguito le prove o, se non altro, gli scavi necessari per effettuare le prove dirette o i prelievi per l'esecuzione di quelle di laboratorio.

9. Lavori in terra e relative fondazioni in Giappone

Nei criteri di *progettazione di lavori in terra e relative fondazioni in regioni di elevata sismicità* pubblicati dalla SOCIETÀ GIAPPONESE DELLA SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING (opuscolo distribuito in occasione del 2° Congr. Intern. di Ing. Sism. del 1960 in Giappone) in tema di dighe in materiali sciolti è riferito quanto segue.

Nei calcoli di progetto di una diga in terra (e comunque in materiali sciolti) si tiene conto soltanto della sollecitazione sismica orizzontale. Per il calcolo di verifica si ricorre al solito sistema della superficie potenziale di scorrimento cilindrica, approssimativamente a sezione circolare (v. anche TERZAGHI op. cit. 1950).

E' data anche una formula per calcolare il valore dell'angolo i da dare alla scarpata di valle in funzione di k e di φ .

Nella tabella che segue è riportato il valore del coefficiente sismico k .

Coefficiente sismico (orizzontale)		
Categoria	Dighe in terra	Dighe in pietrame o pietrisco (rock-fill)
I	0,15 — 0,25	0,12 — 0,20
II	0,12 — 0,20	0,10 — 0,15

Il valore di k varia, in ciascun intervallo, in funzione delle caratteristiche del terreno di fondazione e dell'importanza dell'opera.

Si accenna anche alla necessità di tener conto delle variazioni della pressione interstiziale durante lo scuotimento sismico (in genere in ogni opera in terra). Si addita anche la necessità di verificare allo scorrimento, allo schiacciamento ed al ribaltamento le opere di sostegno (delle acque o delle terre), tenendo conto anche della sovrapposizione delle sollecitazioni. In sostanza nella nota si riconosce che ancora non si possono impostare le verifiche ed i calcoli su dati sicuri, specialmente perché manca una adeguata sperimentazione «al vero» del comportamento delle opere sotto le forti vibrazioni.

Manca, cioè, un metodo empirico basato su i risultati delle analisi dei danni sismici razionalmente osservati.

10. Criteri seguiti in Giappone per tener conto dell'azione sismica sulle dighe

Dagli studi eseguiti dai giapponesi (e riportati nel capitolo dedicato alle dighe del fascicolo sui criteri antisismici in Giappone, preparato per il 2° Congr. Int. di Ing. Sismica a Tokyo e Kyoto nel 1960) risulta che, in occasione di terremoti (a cominciare circa dal grado VI Mercalli ad andare su) le dighe, comprese quelle in terra, più antiche ed in materiali sciolti in genere hanno subito danni piuttosto frequenti e seri; quelle in calcestruzzo hanno risentito dei terremoti molto forti (grado IX Mercalli). I maggiori danni sembra si siano verificati in caso di terreni di fondazione poco resistenti (per es. limo).

Col criterio statico si adotta k (orizz.) 0,10 - 0,25; per il calcestruzzo si richiedono resistenze maggiori delle normali.

Per le dighe più importanti si ricorre anche a prove dinamiche su modelli.

Talora si considera anche la sollecitazione sismica parallela all'asse della diga.

Sin dal 1922 si adottarono giunti verticali; in quell'epoca si escludevano la dighe ad arco nel territorio giapponese, perché troppo sismico.

Più tardi (1934), ammesso che le fondazioni ricadessero su roccia lapidea idonea, si suggerivano i seguenti valori di k (a bacino pieno).

tipi di dighe	alla base	in sommità
dighe a gravità	0,12 — 0,13	—
dighe a contrafforti	0,12 — 0,15	—
dighe in terra	0,15	0,2 — 0,3 ed anche più

Per il bacino vuoto era concesso di ridurre a metà questi valori.

Si ritenne che l'accelerazione sismica si potesse raddoppiare o anche triplicare, passando dalla base alla sommità della diga.

Nel 1942 furono eseguite determinazioni di oscillazioni sismiche di una diga, che si comportò come monolitica con $T = 0,35 - 0,6$ sec. Più tardi, nel 1949, furono considerate anche le sollecitazioni a flessione; nel 1957 si riconobbe che, oltre al taglio, occorre considerare compressione e trazione.

Circa i periodi propri, T , delle dighe ad arco si è visto che T è maggiore se il bacino è pieno; con una costante di smorzamento di 0,10 e con un periodo fra 0,10 e 0,5 sec l'accelerazione alla base è più forte di quella originaria.

L

Con $\frac{L}{h} = 3 - 4$ (L la lunghezza e h l'altezza

della diga), il periodo non differisce da quello che si ottiene trattando il problema a sole due dimensioni.

E' preferibile il nucleo inclinato a quello centrale.

E' stata messa in vista la necessità di considerare l'equilibrio della diga nelle tre dimensioni sia che si ricorra ai metodi statici, che si impieghino quelli dinamici.

Più tardi si confermò la necessità di considerare un aumento dell'azione sismica dal basso verso l'alto.

Gli studi (nelle tre dimensioni) della spinta dell'acqua durante il terremoto hanno messo in vista l'influenza della larghezza della valle, del periodo di oscillazione dell'acqua, del periodo proprio della diga e del periodo dominante del terremoto: così, per es., una diga bassa con T proprio minore di quello del terremoto si comporta come un corpo rigido.

Anche i giapponesi concludono, però, che lo stato delle conoscenze ancora non soddisfa.

11. Norme italiane

C. SUPINO e F. PENTA (nel *Giorn. del Genio Civile*, 95, 1957) illustrano le ragioni che hanno portato alla redazione dell'articolo (25) del nuovo regolamento per le dighe nel quale, per le dighe in calcestruzzo, sono prescritti i criteri da seguire per garantire l'opera contro i terremoti, escludendo il caso che al disotto della diga o anche nella immediata adiacenza ricada l'area epicentrale di un terremoto di grado superiore al IX Mercalli.

Per le dighe in materiali sciolti non è stato imposto alcun provvedimento speciale: un idoneo nucleo e le dolci scarpate prescritte dovrebbero garen-

tire le opere anche in caso di forti terremoti e di attivazione di faglie con sensibili rigetti del terreno di fondazione.

Nella nota sono riportati vari avvertimenti presi da GUIDI, LEGGET, LUGEON, LOUDERBACK, BURWELL e MONEYMAKER, KIRN, SCHULTZ e CLEAVES, CLOUGH e PIRTZ (con le osservazioni di SPIELMAN e di AMBRASEYS), PUPPINI, DAVIS, CREAGER con JUSTIN e HINDS, DEWELL, KELEN, TÖLKE, PRESS, BOURGIN, WESTERGAARD, BARATTA, CAVASINO, CALOI, GIGNOUX e BARBIER.

Si fa accenno alla necessità di un adeguato franco contro le oscillazioni dell'acqua scossa dal terremoto e di un buon nucleo, di dimensioni sufficienti perché, anche con un rigetto di 2-3 metri, resti garantita la tenuta del manufatto.

Si trascrive qui di seguito l'articolo 25 ricordato. « *Nelle località dichiarate sismiche di prima o seconda categoria ai sensi delle leggi vigenti, la costruzione di sbarramenti murari è consentita soltanto quando la roccia di imposta presenti caratteristiche meccaniche sufficientemente uniformi oltre ai requisiti prescritti dall'articolo 23.*

Nelle località sismiche di prima categoria gli sbarramenti saranno calcolati tenendo conto, in aggiunta alle azioni statiche del peso e dell'acqua, delle corrispondenti azioni dinamiche, le quali, in via semplificativa, potranno essere equiparate:

a) per quanto riguarda l'inerzia della struttura muraria:

1) per le scosse sussultorie, ad un aumento e una diminuzione del peso proprio non minori del 20%;

2) per le scosse ondulatorie, a forze orizzontali, agenti in qualunque senso non minori del 10% del peso proprio delle singole parti;

b) per quanto riguarda l'inerzia dell'acqua, ad una pressione uniformemente distribuita sul paramento non minore del 5% di quella idrostatica al piede.

Le predette forze addizionali potranno essere ridotte alla metà per le zone sismiche di seconda categoria.

Nelle dighe di calcestruzzo armato gli sforzi di trazione complessivi, ottenuti tenendo conto anche delle forze addizionali sopraindicate, potranno affidarsi all'armatura metallica, omettendo la verifica degli sforzi concomitanti nel calcestruzzo che avvolge la detta armatura.

Per aree riconosciute terremotate in base alla loro storia sismica, anche se appartenenti a comuni non compresi nell'elenco allegato al R. decreto - legge 22 novembre 1937, n. 2105, e successivi potrà essere fatto obbligo ai progettisti di osservare le norme precedenti ed in tal caso l'area sarà riportata alla prima o alla seconda categoria in base all'entità ed alla frequenza dei sismi che vi si sono verificati. Qualora le caratteristiche geologiche della località dello sbarramento si presentino in modo particolarmente favorevole, potranno essere adottate azioni dinamiche ridotte rispetto a quelle prescritte nei precedenti commi, anche se la località ricade in comuni iscritti alla prima o seconda categoria».

12. Criteri seguiti per la progettazione delle dighe resistenti ai terremoti in Turchia

Dalla raccolta delle norme sismiche vigenti nei vari paesi del mondo pubblicata dal *Comitato Organizzatore del 2° Congresso Internazionale di Ingegneria Sismica* in Giappone nel 1960, risulta che secondo le norme turche, la verifica di stabilità delle dighe deve essere effettuata per le seguenti condizioni:

- 1) terremoto durante la costruzione;
- 2) terremoto a bacino pieno;
- 3) terremoto durante un istantaneo svaso.

Nelle regioni sismiche di prima categoria si deve tener conto di carichi addizionali orizzontali pari al 20% del peso e verticali pari al 6,66% del peso e debbono essere calcolati i coefficienti di sicurezza corrispondenti a questi due casi. Nelle regioni di seconda categoria i carichi addizionali si riducono alla metà.

In caso di terremoto il coefficiente di sicurezza non deve scendere al disotto dell'unità.

Nel caso di dighe in terra si può trascurare l'effetto idrodinamico dovuto all'acqua invasata. La verifica di stabilità va eseguita col metodo del cerchio svedese modificato; in questa verifica vanno considerati i carichi su menzionati.

A causa della insufficienza dei servizi sismologici non è possibile procedere all'applicazione dei metodi dinamici: non è possibile, per es., procedere all'analisi di risonanza dei manufatti, perché, a causa della detta insufficienza, in quelle regioni non si possono conoscere le caratteristiche delle onde sismiche e quelle dei materiali.

Per le dighe in terra ricadenti nelle regioni sismiche le norme prescrivono che si deve tener presente quanto segue:

1) poiché il materiale sciolto incoerente durante il terremoto può diventare instabile, il volume di tale materiale deve essere ridotto al minimo. Per prevenire il movimento questo tipo di materiale si copre con pietrame grosso fino a blocchi (« scogli ») ecc.;

2) il volume del nucleo impermeabile deve essere aumentato per evitare fughe dell'acqua che penetra nelle crepe eventualmente apertesesi col terremoto;

3) la curvatura in cresta si deve aumentare contro il sovralzamento di acqua che può essere causato da cedimenti dovuti ai terremoti;

4) le rocce (lapidee) in superficie sono fratturate o si fratturano; perciò gli scavi di fondazione e di imposta si debbono approfondire abbastanza per evitare perdite di acque (fino a m 15 in aree prossime a faglie).

Per le norme sismiche vigenti (relative ai fabbricati) in Turchia, vedi la legge n. 4623 (con 35 articoli) riportata nello stesso volume in lingua turca, seguita da un ampio riassunto (in inglese) e dai criteri adottati nella stessa Nazione per la costruzione delle strade nazionali (terrapieni, muri di sostegno, ponti ecc.), per le ferrovie e per le opere portuali.

In queste trattazioni si parla di 1^a e 2^a categoria (classe ecc.); non sono forniti, però, gli elementi (elenchi, cartine ecc.) che permettano di stabilire a quale categoria si debba ascrivere una data località. Occorre, perciò, consultare la carta sismica 1:2 milioni, pubblicata in due fogli.

Un articolo di N. PINAR sulla sismicità della Turchia (esaminata anche su basi geologiche), sulle caratteristiche delle costruzioni (comprese quelle monumentali dell'antichità) e loro comportamento sismico e sugli orientamenti costruttivi nelle varie regioni (aventi diverso carattere sismico e trovantisi in differenti condizioni geografiche in generale) era stato pubblicato negli *Atti del 1° Congresso Internazionale di Ingegneria Sismica*, tenuto in California (BERKELEY, 1956; pp. 22 e seg.). Questo articolo rende una buona idea della situazione sismica di quelle regioni. Maggiori dettagli possono ricavarsi, poi, dai lavori citati dallo stesso PINAR in appendice al suo articolo.

13. Qualche notizia sui criteri seguiti in Russia

Nelle nuove Norme (CH-8-57) sismiche emanate nel 1957 dal Governo Sovietico sono previsti anche i criteri da seguire nei progetti delle dighe e di altre opere idrauliche.

V. A. BIKHOVSKY, J. I. GOLDENBLAT e J. L. KORCHYNSKI (in una nota negli *Atti 2° Congr. Int. di Ingegneria Sismica*, 1960), riferiscono i risultati delle prove su modelli di opere varie sottoposti all'azione delle «piattaforme sismiche». In quanto a dighe, gli AA. riconoscono che i modelli di grandi dighe (ed argini) in materiale sciolto sotto l'effetto della oscillazione della loro base hanno presentato una stabilità notevole in confronto con strutture simili in calcestruzzo con giunti verticali: quivi si sono avuti notevoli danni causati dalla laminazione lungo i giunti. Migliore comportamento hanno mostrato opere in calcestruzzo senza giunti verticali.

Gli AA. riportano anche le condizioni di «porosità» iniziale ottime (36-37%) di una diga in terra sottoposta ad accelerazione orizzontale fra 0,03 e 0,3 g (essendo g l'acc. di gravità): scarpate di 1:2 sono risultate stabili. Numerose esperienze sono state condotte sulle dighe in terra in confronto con quelle in calcestruzzo, facendo variare diversi fattori (inclinazione dei paramenti, porosità, con o senza la spinta dell'acqua ecc.).

14. Conclusioni sui criteri di progetto delle dighe in regioni terremotate

Da tutti gli studi citati può dedursi che:

1) è necessario tener conto dell'azione sismica sia per le dighe in calcestruzzo, che per quelle in materiali sciolti;

2) la progettazione agli effetti sismici nella prima fase deve essere impostata partendo dal criterio statico ricorrendo, cioè, a forze orizzontali di massa ricavate impiegando i coefficienti sismici prescrit-

ti (1) per la località in cui ricade l'opera; tali coefficienti vanno corretti in un senso e nell'altro per tener conto delle caratteristiche geologiche (ed idrogeologiche nel caso di terreni sciolti) del suolo di fondazione; se l'altezza della diga è forte, vanno aumentati procedendo dal basso verso l'alto;

3) in una seconda fase può essere consigliabile (o può addirittura diventare indispensabile per le opere molto importanti per mole o per arditezza progettuale) il ricorso a prove dinamiche su modelli, purché le caratteristiche del sottosuolo siano soddisfacentemente note e legittimamente ripetibili (con i dovuti rapporti di similitudine) in laboratorio;

4) conviene, intanto, tener distinte le dighe in calcestruzzo (a gravità, ad arco, ad arco-gravità ecc.) e dighe in materiali sciolti (in terra, a scogliera, in pietrisco o pietrame, dette rock-fill ecc.), visto che per evitare il pericolo di rovina sotto un terremoto violento, i criteri adatti diversificano e che, mentre una diga del 2° gruppo può anche rimanere funzionante dopo un rigetto discreto del terreno di imposta, è difficile raggiungere lo stesso scopo con una diga in calcestruzzo; queste non debbono essere ubicate sulle aree suscettibili di tali dislocazioni, a cavallo, cioè, di faglie (o contatti) «attive» o che si deve presumere possano riattivarsi;

5) sulle dighe in calcestruzzo costruite in zone epicentrali (anche se si esclude che ricadano su faglie attive) l'azione sismica sarà più violenta, sarà rilevante la componente verticale delle scosse, saranno diversi: periodo dominante del terremoto, durata, rapporto fra sollecitazione al taglio e sollecitazione di flessione, torsione ecc., ma nelle grandi linee non varierà qualitativamente l'effetto; sulle dighe in materiali sciolti gli effetti cambiano di regola anche qualitativamente, spostandosi dalla zona epicentrale (con piccoli periodi e assestamento del materiale, pericolo di fluidificazione ecc.) a quelle più lontane, nelle quali con i più lunghi periodi hanno luogo sollecitazioni paragonabili a quelle statiche capaci di provocare scoscendimenti veri e propri di massa, oltre che fluidificazione della base o del corpo della diga;

6) per le dighe in calcestruzzo, perciò, anzitutto occorre impostare l'opera su formazioni lapidee che non esaltino, cioè, l'entità della scossa sismica originaria, evitare senz'altro le discontinuità di carattere regionale, lungo le quali possono verificarsi movimenti relativi (in qualsiasi direzione) e, poi, dimensionare sulla base dei coefficienti sismici indicati per la zona; per le dighe di una certa importanza occorrerà, infine, verificare la stabilità seguendo la metodologia sperimentale che si va sempre più affermando, sviluppando e perfezionando;

7) per le dighe in terra (scogliera, pietrisco, ecc.), in ogni caso, occorre affidare la sicurezza dell'opera anzitutto a misure qualitative, seguendo l'elenco dei criteri suggeriti da AMBRASEYS che, con qualche aggiunta e completamento si riporterà appresso; nei

(1) Nonostante che le norme di legge in proposito abbiano molto di convenzionale e non sempre siano, senz'altro, veramente molto cautelative per cui vedi al n. 4.

calcoli di verifica di stabilità si assumeranno i coefficienti sismici previsti per le località; si assumeranno i massimi possibili nel caso che il sottosuolo sia troppo « molle », possa fluidificare, dar luogo a cedimenti disuniformi (« differenziali ») ecc.

Massima attenzione va fatta al dimensionamento del nucleo (v. anche SUPINO e PENTA, 1957) e del taglione che deve essere, anch'esso, veramente deformabile; quando si prevede che il sottosuolo possa subire rigetti sensibili, perpendicolarmente, o quasi, all'asse della diga (in un piano verticale o verticaleggiante giacente nella direzione monte-valle), occorre, cioè, che taglione e nucleo, pur deformandosi, conservino la continuità e con essa la tenuta del corpo della diga, anche se una parte di questa viene spostata (rigettata) rispetto all'altra di qualche metro.

Avvertenze speciali vanno osservate anche per il franco, per le ragioni già esposte.

15. Accorgimenti speciali per le dighe in terra

N. N. AMBRASEYS, che studia da tempo la statica delle dighe in caso di terremoti, in una comunicazione in proposito al 2° Congresso Internazionale di Ingegneria Sismica (1960), a conclusione delle sue indagini sulle dighe in terra, elenca i seguenti dodici avvertimenti:

1) I diaframmi monolitici o articolati di calcestruzzo mettono in pericolo la stabilità di una diga in terra; si deve evitare di affidare la tenuta del manufatto a tali tipi di diaframmi o a rivestimenti di calcestruzzo.

2) Bisognerebbe asportare dalla superficie della fondazione ogni strato sottile o lente di materiale superficiale non resistente.

3) Bisognerebbe evitare la sistemazione dello sfioratore sulla struttura principale o l'attraversamento della diga con gli scarichi o con la derivazione.

4) Il taglione dovrebbe essere preferibilmente di argilla bene impastata (« puddle clay ») di spessore piuttosto abbondante e, là dove si ricorre a nuclei di argilla compattata, questi dovrebbero avere dimensioni più che sufficienti e preferibilmente dovrebbero essere inclinati verso monte; occorrono sempre filtri di generose dimensioni.

5) Bisognerebbe lasciare un sostanziale franco; è sempre indispensabile la protezione con scogliera della scarpata di valle.

6) Bisognerebbe evitare imposte « deboli »; se si iniettano formazioni deboli, le pressioni di iniezione non debbono essere eccessive.

7) Sponde troppo ripide nel serbatoio e che potrebbero divenire instabili sotto le scosse sismiche dovrebbero essere raddolcite fino a raggiungere inclinazioni sismicamente stabili, prima di iniziare l'invaso; ciò per evitare onde d'acqua del tipo maremoto dovute ad improvvisi franamenti.

8) Gli scarichi dovrebbero essere provvisti di valvole e non solo agli imbocchi; i meccanismi di comando delle paratoie e delle valvole dovrebbero es-

sere semplici e tali da garantire il rapido funzionamento in caso di emergenza.

9) E' consigliabile esaminare la stabilità delle scarpate verso monte delle più grandi dighe in terra nelle condizioni di un rapido svaso coincidente con una replica.

Non è improbabile che frane e scoscendimenti nel serbatoio provochino delle onde, dopo la principale scossa, che possono produrre un quasi istantaneo spostamento del pelo dell'acqua. In questo caso la parte più alta della diga può essere soggetta anche agli effetti di una variazione del battente di acqua di 10 - 15 m.

10) Bisognerebbe evitare terreni di fondazione tipo silt saturo di acqua, sabbie mediamente sature e argille « sensitive ». Bisognerebbe, inoltre, evitare materiali aventi caratteristiche elastiche molto differenti fra loro.

11) Occorre, poi, esaminare la stabilità post-sismica, tanto della diga, quanto della sua fondazione. In seguito all'azione degli intensi sforzi applicati sul terreno (e che poi si scaricano) agiranno i valori delle residuali pressioni dell'acqua interstiziale: la loro dissipazione col tempo può portare o ad una variazione dello stato di addensamento (ulteriore consolidamento) o ad un rigonfiamento del materiale della diga e della fondazione.

12) Evitare l'impostazione di una grande diga in terra a cavallo di una faglia « attiva ».

Conviene ancora richiamare l'attenzione sui seguenti accorgimenti:

13) Dopo ogni terremoto occorre rivedere le scarpate e controllare funzionamento ed andamento dei drenaggi.

14) Per tutte le dighe ed opere connesse occorre fissare alle loro basi le strutture fuori acqua per evitare che esse siano spostate dalle onde di sollevamento (e da spinte idrodinamiche) a causa del terremoto (o di altri fatti come le frane): le oscillazioni del pelo libero che seguono l'improvvisa variazione di volume dell'acqua contenuta nel serbatoio (dovuta a frane, provocate o no da sisma) possono smuovere ed asportare strutture non sufficientemente vincolate.

15) Tutte le opere connesse (derivazione, scarichi, ecc.) devono essere progettate, dimensionate e sistemate in modo da ridurre al minimo le alee sismiche; per queste opere valgono i criteri specifici per ciascuna di esse e quelli generali per ogni specie di lavoro in regioni sismiche.

Per maggiori particolari, si rimanda alle note originali richiamate nel testo, le quali, per la gran parte, sono riassunte e recensite nel *Giornale del Genio Civile* del 1961 e del 1962. Allo stesso *Giornale* si rimanda anche per le complete indicazioni bibliografiche.

Roma (S. Pietro in Vincoli), Centro di Studio per la Geologia Tecnica del C.N.R. presso l'Istituto di Geologia Applicata della Facoltà di Ingegneria (dell'Università), 11 febbraio 1962.

Prof. Ing. Francesco Penta