

COSTRUZIONI IN TERRA*

Luca Pagano, Stefania Sica

Premessa

Le costruzioni in terra sono diffusamente utilizzate per la realizzazione di rilevati, argini e dighe in terra. La costruzione avviene solitamente utilizzando tecniche di costipamento (mezzi meccanici impiegati, spessore degli strati, contenuto d'acqua ed energia di compattazione) che dipendono dall'assortimento granulometrico del materiale adottato e dalle prestazioni meccaniche richieste. Il costipamento induce in genere un incremento di resistenza e di rigidità del materiale. Le opere in terra esistenti, in esercizio da molti decenni, possono essere state costruite con procedure di posa in opera poco efficienti e possedere pertanto proprietà di rigidità e resistenza non adeguate alle prestazioni attualmente richieste.

Le diverse categorie di opere in terra vengono realizzate per assolvere a funzioni diverse; sono pertanto diversi i requisiti prestazionali richiesti in presenza di eventi sismici di forte intensità: in una diga in terra o in un argine fluviale deve, ad esempio, essere garantita la tenuta idraulica, mentre per un rilevato stradale o ferroviario può essere necessario garantirne la percorribilità. Anche i meccanismi di danneggiamento da verificare possono, pertanto, risultare diversi unitamente alle procedure di verifica. Le dighe in terra non devono subire, ad esempio, fratturazioni dell'elemento di tenuta idraulica e possono, in una misura contenuta, sviluppare cedimenti permanenti; i rilevati stradali e ferroviari, al contrario, possono subire fenomeni di fratturazione interni al corpo rilevato mentre cedimenti anche modesti possono in taluni casi inficiare o compromettere seriamente la percorribilità.

Nel seguito verranno trattate le procedure di verifica sismica suggerite per le costruzioni in terra; per i motivi sopra illustrati, tali procedure verranno trattate separatamente per ciascuna delle quattro categorie di opere elencate all'inizio.

Rilevati stradali

Posizione del problema

La verifica della sicurezza sismica dei rilevati stradali può essere finalizzata a:

- garantire la percorribilità dell'arteria: *verifica di percorribilità (VP)*
- garantire l'incolumità del singolo conducente: *verifica di sicurezza (VS)*

* Alla redazione del presente capitolo ha collaborato Sebastiano Rampello.

- limitare i danneggiamenti con lo scopo di limitare i costi delle riparazioni post-sismiche: *verifica economica (VE)*

In presenza di eventi sismici rari è bene che sia soddisfatta la verifica di percorribilità se l'arteria costituisce un'importante via di accesso per prestare soccorso alle popolazioni colpite. Verificare la percorribilità in corrispondenza di un tratto di strada in rilevato corrisponde a verificare che la deformata del piano di posa sia compatibile con la percorribilità dell'arteria, ammettendosi al limite una riduzione di capacità di portata dell'arteria stessa. Significativi stati fessurativi all'interno del rilevato o fenomeni di instabilità possono essere in linea di principio ammessi se consentono di mantenere i requisiti di portata richiesti all'arteria. La casistica di danni prodotti da eventi sismici su rilevati stradali indica che tali opere si comportano in modo soddisfacente rispetto a problemi di instabilità globale. La percorribilità spesso viene limitata o impedita da processi deformativi del corpo rilevato che si sviluppano in corrispondenza del contatto con opere strutturali rigide, tipicamente tombini di attraversamento, accesso a viadotti o ponti. In tal caso infatti il cedimento permanente del rilevato diviene anche cedimento differenziale fra rilevato e opera strutturale, la quale tipicamente subisce cedimenti modesti. In alcuni casi l'evento sismico può produrre anche il distacco orizzontale fra rilevato e opera strutturale. La verifica di percorribilità può essere condotta stimando il cedimento permanente del rilevato in corrispondenza delle sezioni a contatto con strutture rigide. Proporre una limitazione del cedimento permanente ha il significato di proporre una limitazione di tutte le componenti dello spostamento che possono interessare il rilevato in direzione orizzontale e verticale. Tale limitazione può intendersi pertanto come contenimento sia dello "scalino" sia del distacco orizzontale fra rilevato e opera strutturale.

Rispetto a eventi sismici più frequenti è opportuno garantire l'incolumità del singolo conducente (verifica di sicurezza) verificando comunque che non ci sia collasso dell'opera.

Per opere di nuova costruzione sarebbe opportuno limitare i danneggiamenti del rilevato con lo scopo di limitare anche i costi connessi alla riparazione post-sismica (verifica economica).

Stati limite e terremoti di progetto

In linea con la recente filosofia di progettazione antisismica basata sugli stati limite, per i rilevati stradali possono essere definiti due eventi sismici a differente probabilità di superamento nei confronti dei quali si richiedono differenti prestazioni dell'opera:

- 1) il terremoto probabile L_1 che è atteso uno o più volte nella vita utile dell'opera; a fronte di tale evento per rilevati di nuova costruzione sarebbe opportuno assicurare che i danni siano modesti e che sia modesta di conseguenza la riduzione del livello di percorribilità (verifica economica); nel caso di rilevati esistenti, se la normativa non fornisce indicazioni in merito, può essere ragionevole tralasciare la verifica economica, mentre è opportuno salvaguardare l'incolumità del singolo conducente (verifica di sicurezza);

- 2) il terremoto severo L_2 , a fronte del quale è necessario assicurare la percorribilità in misura proporzionata all'importanza dell'arteria cui appartiene.

Definizione dell'input sismico

Le azioni sismiche di progetto vengono definite sulla base di due elementi. Il primo consiste nel livello di protezione sismica assegnato all'opera in dipendenza della sua importanza. Il secondo dipende dalla pericolosità sismica del sito. Il livello di protezione può essere sinteticamente rappresentato dal periodo di ritorno T dell'evento sismico di riferimento. Il valore di T si può correlare ad un parametro che sintetizza quantitativamente sia la vulnerabilità dell'opera in terra sia l'importanza dell'arteria stradale cui l'opera in terra appartiene. La vulnerabilità del rilevato stradale può essere espressa in forma approssimata dalla massima altezza del manufatto. L'importanza dell'arteria è funzione del ruolo che essa svolge per far fronte all'emergenza (soccorso alle popolazioni colpite e/o limitazione dei danni di tipo industriale, chimico o ambientale indotti dal sisma). Tipicamente, tale ruolo è correlabile alla categoria della strada in considerazione (autostrada, strada statale, strada provinciale, strada comunale).

In mancanza di riferimenti normativi si suggerisce di correlare l'importanza del rilevato stradale al periodo di ritorno T degli eventi L_1 ed L_2 . A titolo di esempio, le Tabelle 16.1 e 16.2 individuano il periodo di ritorno degli eventi sismici L_1 ed L_2 assegnando un punteggio a ciascun fattore che concorre a definire l'importanza dell'opera, quali l'altezza, il numero di persone da servire, i danni indotti (Tabella 16.1). Sommando i punteggi relativi ai tre fattori della Tabella 16.1 si individua un fattore totale di classificazione cui si associa la categoria di importanza del rilevato. La Tabella 16.2 classifica il rilevato in quattro categorie in ordine decrescente di importanza ed assegna, sulla base di tale fattore, i periodi di ritorno da considerarsi associati agli eventi L_1 e L_2 .

Gli eventi sismici di progetto possono essere determinati seguendo le indicazioni riportate nel Capitolo 4, portando eventualmente in conto gli effetti di sito connessi alla particolare costituzione del sottosuolo in esame (Capitolo 6).

Metodi di calcolo e di verifica

E' opportuno che le verifiche sismiche dei rilevati stradali siano realizzate diversamente a seconda di come si combinano l'importanza dell'opera e la pericolosità sismica del sito. La combinazione di questi due fattori consente di individuare la metodologia di analisi con cui effettuare la verifica (Tabella 16.3 e 16.4) e il valore di soglia del cedimento differenziale permanente.

Non essendo ancora disponibili modellazioni matematico-numeriche consolidate per risolvere un problema di previsione di cedimenti permanenti attraverso un'analisi dinamica completa, si suggerisce di stimare il cedimento con approcci semplificati. Nei problemi di maggiore rilevanza può essere adottato il metodo di Newmark (Appendice H). Per problemi di rilevanza media è possibile limitarsi all'uso delle formule empiriche che stimano il cedimento in funzione dell'accelerazione critica e di alcune caratteristiche del sisma di riferimento quali l'accelerazione di picco, l'intensità di Arias, il potenziale

sismico distruttivo, ecc.. Per problemi di scarsa rilevanza è sufficiente garantire, attraverso un approccio pseudostatico e per il solo evento L_1 , che non si verifichi il collasso globale del rilevato che possano coinvolgere singoli conducenti (verifica di sicurezza).

L'analisi dinamica semplificata effettuata con il metodo di Newmark fornisce una previsione di cedimento non nullo solo se l'accelerazione supera il cosiddetto valore di soglia, ovvero, se si forma un meccanismo di scorrimento globale cinematicamente compatibile. In assenza di meccanismi di scorrimento globale, i cedimenti che potrebbero compromettere la percorribilità dell'arteria richiedono lo sviluppo di deformazioni verticali permanenti tipicamente superiori al 10%. E' verosimile pensare che in materiali abbastanza rigidi in quanto costipati, meccanismi di scorrimento globale si inneschino prima che si sviluppino processi deformativi così spinti e che quindi lo sviluppo di cedimenti permanenti sia in larga misura congruente con il meccanismo ipotizzato da Newmark. Poiché tale approccio trascura gli effetti delle deformazioni permanenti (sia distorsionali sia volumetriche) che si sviluppano nel corpo rilevato prima che i valori di accelerazione attingano il valore di soglia, si consiglia di incrementare il cedimento previsto con tale metodo in misura percentuale inversamente proporzionale all'intensità dell'evento (si consiglia un incremento del 40% del cedimento calcolato per effetto dell'evento L_1 e un incremento del 15% del cedimento calcolato per effetto dell'evento L_2). Ciò in considerazione del fatto che se l'evento ha intensità maggiore, l'aliquota di cedimento permanente associabile all'innescio di un meccanismo di scorrimento globale cresce rispetto all'aliquota di cedimento permanente associabile alla fase pre-soglia. Le soglie di cedimento ammissibili suggerite in mancanza di indicazioni fornite dalla normativa sono di 3-7 cm per effetto dell'evento L_1 e di 15-20 cm per effetto dell'evento L_2 .

Rilevati ferroviari

Per i rilevati ferroviari le procedure di verifica sismica sono concettualmente analoghe a quelle illustrate per i rilevati stradali. Tuttavia le soglie ammissibili di cedimento permanente devono essere ridotte notevolmente (circa un ordine di grandezza) conformemente ai requisiti di percorribilità ferroviaria, e devono essere considerate a prescindere dalla presenza o meno di un'opera contigua più rigida. In realtà per inibire la percorribilità ferroviaria sono sufficienti spostamenti dell'ordine di pochi millimetri. Valori ammissibili così bassi possono essere rispettati in presenza di un evento L_1 mentre non è verosimile pensare a soglie di tolleranza così basse per un evento L_2 . Una soglia di tolleranza verosimile rispetto a L_2 deve essere dell'ordine di qualche centimetro ed ha il senso non tanto di garantire la percorribilità quanto di consentirne un rapido ripristino.

Dighe in terra

Posizione del problema

Una diga in terra è un rilevato in materiali sciolti che sbarra un corso d'acqua e sottende un bacino artificiale. Le dighe in terra possono ricondursi essenzialmente a tre tipologie strutturali: (1) dighe omogenee, in cui un unico elemento in terra garantisce sia la tenuta statica sia la tenuta idraulica; (2) dighe zonate, nelle quali più elementi in terra con diverse proprietà fisico-meccaniche determinano la tenuta statica e/o la tenuta idraulica; (3) dighe con paramento di monte impermeabilizzato, in cui uno o più elementi in terra assicurano la tenuta statica mentre un elemento artificiale di bassa permeabilità posto sul paramento di monte (solitamente calcestruzzo o materiale bituminoso) assicura la tenuta idraulica.

I terremoti registrati nel passato in zone ad alta attività sismica hanno sinora evidenziato un comportamento generalmente soddisfacente delle dighe in terra, ad eccezione di quelle realizzate senza adeguate tecniche di posa in opera dei materiali da costruzione.

Tuttavia, in virtù dell'elevata esposizione generalmente associata a queste opere, nella progettazione e/o verifica antisismica devono essere ammessi livelli di protezione generalmente superiori a quelli riservati alle costruzioni ordinarie ricadenti nella stessa zona sismica.

Stati limite e terremoti di progetto

Anche per le dighe in terra possono essere definiti due eventi sismici a differente probabilità di superamento nei confronti dei quali si richiedono differenti prestazioni dell'opera:

- 1) il terremoto probabile L_1 che è atteso uno o più volte nella vita utile della diga e a fronte del quale l'opera e le sue parti accessorie devono conservare la loro completa funzionalità (ICOLD, 1988);
- 2) il terremoto severo L_2 che non deve causare il rilascio incontrollato dell'acqua di invaso ed a seguito del quale deve essere comunque possibile svasare la diga in tempi rapidi (cioè, non si devono verificare danni alle opere di scarico di superficie o di fondo ed, in generale, a tutte le opere accessorie *critiche*¹).

Il grado di danno a seguito del terremoto di modesta intensità (L_1) deve essere di I livello (Capitolo 3). Il sistema diga, in cui sono incluse anche le opere accessorie, deve rimanere, cioè, completamente operativo subendo danni strutturali trascurabili.

Il grado di danno prodotto dal terremoto poco probabile (L_2) non deve comportare l'attingimento di una condizione di collasso e/o di perdita della funzionalità della diga, anche in presenza di danni strutturali ingenti.

¹ Si definiscono *critiche* le opere accessorie il cui mancato funzionamento ostacola lo svuotamento tempestivo e controllato dell'invaso

In assenza di riferimenti normativi specifici, le dighe in esercizio progettate senza portare in conto o sottostimando le azioni sismiche devono essere verificate quantomeno rispetto al collasso a fronte del terremoto più severo L_2 .

La verifica del comportamento della diga assoggettata al terremoto L_2 deve scongiurare l'occorrenza degli stati limite di seguito elencati, meccanismi che da soli o in concomitanza con altri, possono determinare il rilascio incontrollato dell'acqua di invaso:

- fenomeni di instabilità dei paramenti tali da determinare una significativa riduzione del franco;
- fenomeni di liquefazione nel corpo diga o nelle fondazioni;
- eccessiva compattazione del rilevato o del terreno di fondazione tale da comportare una consistente diminuzione del franco;
- fratturazione dell'elemento di tenuta idraulica;
- lesioni nel rilevato, nei terreni di fondazione o in corrispondenza del contatto con le strutture o le spalle attraverso le quali può avere luogo una filtrazione incontrollata;
- fenomeni di instabilità delle sponde o delle spalle che possano provocare la tracimazione del coronamento o il dissesto della struttura.

Definizione dell'input sismico

Le azioni sismiche di progetto vengono definite sulla base del livello di protezione che si intende assegnare all'opera e della pericolosità sismica del sito. Il livello di protezione è sintetizzato quantitativamente attraverso il periodo di ritorno T dell'evento sismico di riferimento (L_1 o L_2), e viene posto in relazione funzionale con l'importanza dell'opera. Quest'ultima dipende dalla vulnerabilità della struttura e dal livello di esposizione, ovvero dei potenziali danni che l'opera può arrecare a valle. All'aumentare dell'importanza dell'opera si suggerisce di incrementare il livello di protezione assumendo un maggior valore del periodo di ritorno T associato all'evento di riferimento.

La vulnerabilità della struttura dipende essenzialmente dalle caratteristiche geometriche della diga (volume di invaso, altezza dello sbarramento). L'esposizione dipende dalle caratteristiche demografiche ed economiche del territorio a valle (numero di abitanti, perdite economiche dirette o indotte dal rilascio incontrollato dell'acqua di invaso).

Sulla base dell'importanza dell'opera (vulnerabilità+esposizione) e della pericolosità sismica del sito è opportuno valutare la necessità o meno di realizzare studi sismologici relativi al sito di ubicazione dell'opera.

Nel caso di dighe di modesta importanza ricadenti in zone a bassa sismicità, lo studio sismologico può essere omesso. In tal caso è sufficiente riferirsi ai valori di accelerazione di riferimento indicati dalla normativa, eventualmente amplificati per portare in conto gli effetti di sito. In caso contrario occorre effettuare uno studio *ad hoc* dei meccanismi sismogenetici attivi e degli effetti di sito che concorrono a determinare il moto sismico alla base dell'opera.

Metodi di calcolo e verifica

Verifica di stabilità globale

Indipendentemente dalla combinazione tra importanza dell'opera e pericolosità del sito si suggerisce che la diga, a fronte del terremoto più severo di livello L_2 , sia verificata alla stabilità globale attraverso un approccio di tipo pseudostatico lungo le potenziali superfici di scivolamento che tagliano l'elemento di tenuta. L'eventuale formazione di deformazioni di taglio concentrate e/o fratture all'interno dell'elemento di tenuta possono infatti innescare processi erosivi e portare la diga rapidamente al collasso, prima che sia possibile realizzare lo svasso dell'opera. In condizioni di massimo invaso è necessario verificare alla stabilità globale i paramenti di valle e di monte. Se la diga è caratterizzata da oscillazioni frequenti e significative dei livelli d'invaso è opportuno verificare la stabilità globale del pendio di monte anche in condizioni di rapido svasso. In tal caso infatti è probabile che la condizione di rapido svasso si combini con la condizione di carico sismico.

Indipendentemente dall'importanza dell'opera, nella verifica pseudostatica si consiglia di assumere il valore del coefficiente sismico suggerito dalla normativa. Se questo ha il significato di accelerazione massima attesa al sito, è consigliabile che l'eventuale utilizzo di un coefficiente riduttivo sia vagliato da analisi che portano in conto la variabilità spaziale e temporale delle azioni inerziali all'interno del rilevato (Appendice H).

Nei casi in cui si effettuino appositi studi sismologici, l'opera deve essere verificata alla stabilità globale col metodo pseudostatico anche rispetto alle azioni sismiche derivanti da tali studi, generalmente restituite sotto forma di accelerogrammi. In tal caso il coefficiente sismico può essere stimato in modo più razionale attraverso un'analisi bidimensionale di risposta sismica locale mediante l'approccio lineare equivalente. Per ogni istante t , dividendo la risultante delle azioni orizzontali agenti lungo la superficie di scorrimento per il peso dell'intera massa potenzialmente instabile (Fig. 16.1) si ottiene un coefficiente sismico medio lungo la superficie di scorrimento $k_{av}(t)$ (Chopra, 1966). Nella verifica si può utilizzare il valore massimo del coefficiente sismico calcolato in funzione del tempo.

In alternativa è possibile utilizzare direttamente gli stati tensionali ottenuti dall'analisi dinamica per il calcolo del coefficiente di sicurezza pseudostatico, senza passare attraverso il calcolo del coefficiente sismico. A tal fine si divide la resistenza a taglio disponibile lungo la superficie di scorrimento S_f (definita come sommatoria della resistenza a taglio τ_{fi} alla base di ogni singola striscia moltiplicata per la larghezza b_i della striscia) per la risultante S_m degli sforzi di taglio mobilitati dal sisma (calcolata come sommatoria degli sforzi di taglio τ_{mi} indotti dal sisma alla base di ogni striscia per la larghezza b_i della stessa):

$$FS(t) = \frac{\sum S_{fi}}{\sum S_{mi}} = \frac{\sum \tau_{fi} b_i}{\sum \tau_{mi} b_i} \quad FS = \text{valor medio di } FS(t) \quad (16.1)$$

In tutte le tipologie di diga se la superficie di scorrimento critica intercetta l'elemento di tenuta il coefficiente di sicurezza deve risultare sempre non minore del valore indicato dalla normativa vigente.

Se la superficie di scorrimento critica non intercetta l'elemento di tenuta (superfici corticali) il coefficiente di sicurezza può essere anche inferiore all'unità. In tal caso occorre verificare, attraverso un'analisi dinamica semplificata con il metodo di Newmark (Appendice H), che il massimo cedimento del coronamento a fronte del terremoto più severo non ecceda un valore pari a 1-2% dell'altezza della diga.

La possibilità di una degradazione del materiale in regime di sollecitazione ciclico e di un accumulo di sovrappressioni neutre può essere portato in conto solo attraverso una riduzione della resistenza a taglio. In particolare in letteratura si suggerisce di assumere valori pari a circa 80% della resistenza statica per i terreni granulari addensati ed a 60% per quelli sciolti, in relazione alla minore o maggiore tendenza all'accumulo di sovrappressioni neutre in condizioni non drenate.

Verifica degli stati deformativi

Se a fronte del terremoto meno probabile la verifica di stabilità globale è soddisfatta, anche la verifica di sicurezza nei confronti della tracimazione risulta generalmente soddisfatta. Possono fare eccezione le dighe costituite da materiali caratterizzati da significativo degrado ciclico della rigidità o le dighe realizzate senza l'adozione delle moderne tecniche di costipamento.

E' bene anche verificare che le deformazioni permanenti all'interno del corpo diga non siano eccessive onde evitare la formazione di fratture e conseguenti zone di innesco di fenomeni erosivi. Eccessive deformazioni possono peraltro compromettere la funzionalità delle opere accessorie.

Gli effetti deformativi prodotti dal sisma L_2 possono essere valutati attraverso un'analisi dinamica completa che richiede un'approfondita conoscenza delle caratteristiche meccaniche del sistema diga-fondazione ed un'adeguata definizione del moto sismico di riferimento. L'applicazione di tale tipo di analisi richiede la risoluzione di un complesso sistema matematico costituito dall'equazioni indefinite dell'equilibrio, dall'equazioni di congruenza, dalla legge costitutiva del mezzo, e, per materiali per i quali è significativo considerare l'interazione fra le fasi, anche dall'equazione di continuità della fase liquida. Nel modellare il comportamento meccanico del terreno bisogna prendere in considerazione i fenomeni di variazione delle proprietà meccaniche che si manifestano al crescere dei livelli deformativi imposti dalla storia di carico sismica. In particolare, bisogna esaminare i possibili fenomeni di degradazione della rigidità per effetto della storia di carico ciclica imposta e la possibile riduzione di resistenza al taglio legata all'eventuale incremento delle pressioni interstiziali. Quest'ultimo fenomeno è determinato dall'insorgere di deformazioni di natura plastica. Di conseguenza, per schematizzare il comportamento del terreno è necessario utilizzare modelli costitutivi che siano adeguati a descriverne con continuità il comportamento del terreno per livelli deformativi che vanno dal campo delle piccole a quello delle grandi deformazioni.

Se il legame costitutivo del terreno è espresso in termini di tensioni efficaci e l'analisi è di tipo accoppiato, oltre alle deformazioni si può avere una stima affidabile anche delle sovrappressioni neutre indotte dal sisma. Tale tipo di analisi richiede soluzioni di

tipo numerico (tipicamente FEM o FDM) implementate in codici di calcolo di tipo commerciale.

Gli stati deformativi calcolati attraverso un'analisi dinamica completa devono essere tali che in occasione del sisma di livello L_2 i cedimenti permanenti del coronamento siano inferiori a 1-2% l'altezza della diga.

Verifica della suscettibilità alla liquefazione

L'innescio di fenomeni di liquefazione può determinare l'instabilità di grossi volumi di terreno che evolvono in colata fino al collasso catastrofico dell'opera.

La valutazione del potenziale di liquefazione dei terreni del rilevato o di fondazione, e' richiesta in presenza di terreni sciolti saturi poco addensati e a granulometria uniforme e può essere effettuata ricorrendo a prove e determinazioni in sito o in laboratorio secondo le indicazioni riportate nel Capitolo 7 delle linee guida. Quando sussistano indizi che possano far presumere l'esistenza di condizioni favorevoli alla liquefazione, e non sia possibile stimare in modo cautelativo tali condizioni, dovranno essere effettuate indagini e prove specifiche volte ad acquisire i dati necessari per verificare la sicurezza nei confronti di questo fenomeno.

Raccomandazioni sul monitoraggio statico e sismico di dighe in terra

I dati del monitoraggio statico di dighe esistenti devono essere preliminarmente raccolti ed analizzati per valutare la sicurezza della diga in campo statico. Ove mai tali analisi dovessero evidenziare significative deficienze della diga associate alla tenuta o a problemi di stabilità risulta del tutto priva di significato la verifica sismica.

Le dighe ricadenti nelle zone dichiarate sismiche dalla normativa vigente è opportuno che siano dotate di strumenti per il monitoraggio del comportamento sismico. Di norma si deve considerare l'installazione di almeno due accelerometri di tipo *strong-motion*, uno alla quota della fondazione, in campo libero, e l'altro sul coronamento in corrispondenza della sezione di massima altezza. Tali strumenti consentono infatti, in caso di sisma, di caratterizzare i carichi sismici che hanno sollecitato la struttura e supportano pertanto la comprensione dei meccanismi di danneggiamento che possono aver interessato l'opera.

Al verificarsi di un evento sismico avvertito in prossimità del sito di ubicazione di una diga, occorre preliminarmente interrompere il flusso d'acqua attraverso eventuali condotte che attraversano l'opera ed i terreni di fondazione e procedere all'ispezione della diga e del bacino per verificare i seguenti elementi:

- per la diga: lesioni, cedimenti, infiltrazioni d'acqua;
- per le imposte: spostamenti, lesioni, nuove venute d'acqua, movimenti di massi rocciosi;
- per i drenaggi: aumento delle portate o rottura del sistema drenante;
- per le opere accessorie: dissesti strutturali, distorsioni alle paratoie che ne ostacolano il funzionamento;
- per il serbatoio: frane e cadute di massi, fratture sulle superficie del terreno;
- anomalie della strumentazione.

Opere accessorie

Le opere accessorie di una struttura di sbarramento (sfioratori di superficie, scarichi profondi, paratoie e strumentazione di controllo, ecc.) devono essere considerati nella verifica sismica delle dighe allorché la rottura o il mancato funzionamento può portare alla perdita di controllo dell'invaso. L'aspetto più delicato è stabilire se l'elemento preso in considerazione è "critico" ai fini della sicurezza.

Per collasso di un'opera accessoria si intende sia un danno strutturale grave sia la perdita di funzionalità che provoca il rilascio incontrollato dell'acqua di invaso e quindi il collasso della struttura di sbarramento.

Le strutture di controllo della regolazione del livello di invaso, paratoie e valvole che fanno parte di opere rilevanti per la sicurezza, devono conservare la funzionalità anche a seguito dell'evento sismico più severo. Analoghe considerazioni possono essere estese a strade, passerelle, gallerie, ascensori e ponti che consentono l'accesso a zone strategiche per la sicurezza dello sbarramento.

Argini fluviali

Se sono bagnati solo in coincidenza di eventi di piena la condizione piena+sisma è tipicamente poco probabile e non dovrebbe essere contemplata. Ha senso solo la verifica economica per argini di nuova progettazione attraverso l'approccio pseudostatico rispetto all'evento L_1 , mentre non ha senso la verifica rispetto all'evento L_2 . Se esiste (da verificare) la condizione prolungata di argine bagnato è necessario seguire procedure di verifica più articolate nelle quali devono essere considerati l'esposizione dell'opera e l'evento L_2 .

Bibliografia

Chopra A.K. (1966), Earthquake effects on Dams. *PhD Thesis*, Univ. of California, Berkeley.

ICOLD (1988), *Dam design criteria, the philosophy of their selection*, International Commission On Large Dams, Paris, Dam Safety Guidelines, Bull. 61.

ICOLD (1989), Dam Safety Guidelines, Bull. 72.

<i>Altezza (m)</i>	<i>>15 (6)</i>	<i>15-8 (4)</i>	<i>8-3 (2)</i>	<i><3 (0)</i>
<i>Numero. di persone da servire/Categoria dell'arteria</i>	<i>>100000 autostrada (12)</i>	<i>100000-10000 statale (8)</i>	<i>10000-1000 prov./com. (4)</i>	<i><1000 (4)</i>
<i>Danni indotti</i>	<i>Elevati (12)</i>	<i>Moderati (8)</i>	<i>Bassi (4)</i>	<i>Trascurabili (0)</i>

Tabella 16.1 – Fattori di classificazione dell'importanza del rilevato.

<i>Fattore totale di classificazione</i>	<i>Categoria di importanza del rilevato</i>	<i>Periodo di ritorno dell'evento L_1</i>	<i>Periodo di ritorno dell'evento L_2</i>
<i>(25-30)</i>	<i>I</i>	<i>50-200</i>	<i>>1000</i>
<i>(15-25)</i>	<i>II</i>	<i>50-200</i>	<i>500-1000</i>
<i>(5-15)</i>	<i>III</i>	<i>50-100</i>	<i>150-500</i>
<i>(0-5)</i>	<i>IV</i>	<i>50-100</i>	<i>100-250</i>

Tabella 16.2 – Categoria di importanza del rilevato.

<i>Categoria di importanza del rilevato</i>	<i>Zona sismica in cui ricade il sito di ubicazione del rilevato</i>			
	1	2	3	4
I	dinamica semplificata	dinamica semplificata	formule empiriche	formule empiriche
	(VP/VS/VE)	(VP/VS/VE)	(VP/VS/VE)	(VS)
II	dinamica semplificata	dinamica semplificata	formule empiriche	formule empiriche
	(VP/VS/VE)	(VP/VS/VE)	(VP/VS/VE)	(VS)
III	formule empiriche	formule empiriche	formule empiriche	formule empiriche
	(VP/VS/VE)	(VP/VS/VE)	(VP/VS/VE)	(VS)
IV	formule empiriche	formule empiriche	formule empiriche	formule empiriche
	(VS)	(VS)	(VS)	(VS)

Tabella 16.3 – Metodologie di analisi e livelli di prestazione richiesti ai rilevati stradali a seguito del sisma probabile L_1 .

Categoria di importanza del rilevato	Zona sismica in cui ricade il sito di ubicazione del rilevato			
	1	2	3	4
I	dinamica semplificata	dinamica semplificata	formule empiriche	-
	(VP)	(VP)	(VP)	
II	dinamica semplificata	dinamica semplificata	formule empiriche	-
	(VP)	(VP)	(VP)	
III	formule empiriche	formule empiriche	formule empiriche	-
	(VP)	(VP)	(VP)	
IV	-	-	-	-

Tabella 16.4 – Metodologie di analisi e livelli di prestazione richiesti ai rilevati stradali a seguito del sisma severo L_2 .

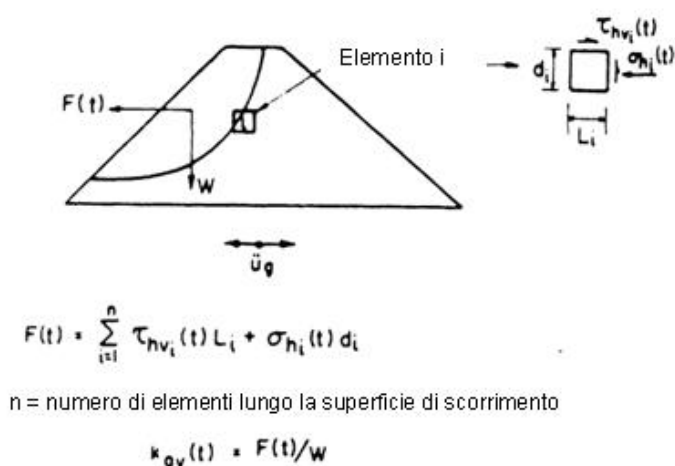


Figura 16.1 Esempio di calcolo del coefficiente sismico medio $k_{av}(t)$ lungo la superficie di scorrimento combinando l'approccio lineare equivalente con l'analisi pseudostatica (Chopra, 1966)

