



*Consiglio Superiore
dei Lavori Pubblici*

Sezioni riunite: Prima e Quarta

Adunanza del **16.11.2007**
N. del Protocollo **21**

Rivalutazione della sicurezza sismica delle grandi dighe ai sensi dell'art. 4 del D.L. 79/04 convertito con L. 139/04 – Norme Tecniche.

AFFARI GENERALI

LE SEZIONI RIUNITE

VISTA la nota n. 813 del 2.02.2007 con la quale il Registro Italiano Dighe ha trasmesso gli atti relativi all'affare indicato in oggetto;

ESAMINATI gli atti;

UDITA la Commissione Relatrice (IANNIELLO, FERRANTE, BRAGA, NUTI, MESSERE, NATALE, DA DEPPO, BURGHIGNOLI)

PREMESSO

Il Decreto Legge 29 marzo 2004 n°79, convertito con modificazioni dalla Legge 28 maggio 2004 n°139 all'art. 4, dispone, fra l'altro che il Registro Italiano Dighe predisponga le Norme Tecniche relative alla verifica sismica delle grandi dighe, da adottarsi secondo le procedure di cui all'art. 52 del D.P.R. n°380/2001.

Pertanto, il Registro Italiano Dighe ha predisposto lo schema di Norme Tecniche ora in esame, nella forma di Linee Guida per la valutazione della sicurezza sismica delle dighe in esercizio. Detto schema di Norma è stato trasmesso, per esame e parere, a questo Consiglio Superiore con nota n°813 in data 2-2-2007.

Il documento in esame, di cui si allega copia, si sviluppa nei seguenti capitoli:

1. Generalità
2. Dighe di materiali sciolti
3. Dighe di muratura e di calcestruzzo
4. Scarichi e opere complementari e accessorie
5. Stabilità delle sponde

Il Documento è emanato in applicazione dell'art. 4 comma 2 del D.L. 29-3-2004 n°79, convertito con legge del 28 maggio 2004 n°139.

Le verifiche, effettuate con i criteri riportati nelle Linee guida ora in esame, assolvono sia a quanto disposto dal già citato art. 4 del D.L. n°79/04, sia a quanto previsto dall'art. 2 comma 3 dell'Ordinanza PCM 3274 del 20-3-03.

Le disposizioni normative in esame dovranno essere applicate a tutte le dighe presenti sul territorio nazionale aventi le caratteristiche previste nell'art. 1 del D.L. n°507/94 convertito con Legge n°584/94.

Per quanto si può desumere dalla lettura delle già menzionate Linee Guida, tali dighe possono essere considerate “*opere che possono assumere rilevanza in relazione alle conseguenze di un eventuale collasso*” . Inoltre possono essere considerate “*dighe di interesse strategico*” quelle connesse con il funzionamento di acquedotti interregionali e utilizzate per la produzione di energia elettrica..

Nell'ambito del documento in esame le verifiche sono finalizzate all'accertamento, in caso di eventi sismici estremi, della salvaguardia dell'azione di contenimento dell'acqua di invaso ed a scongiurare la perdita di funzionalità degli organi necessari allo svuotamento controllato del serbatoio. Per le “*dighe di interesse strategico*” le verifiche sono finalizzate, inoltre, all'accertamento della sussistenza del requisito in virtù del quale, in caso di eventi a minore periodo di ritorno, gli eventuali danneggiamenti siano compatibili con il mantenimento in esercizio dell'opera.

Il documento posto all'esame delle Sezioni riunite è riportato integralmente e testualmente di seguito:

“ INDICE

CAP. 1 – Generalità

- 1.1 Introduzione
- 1.2 Sicurezza e la funzionalità sismica dei serbatoi
 - 1.2.1- *Obiettivi di Sicurezza delle Dighe*
 - 1.2.2- *Intensità delle azioni di progetto*
 - 1.2.3- *Definizione dell'azione sismica per le verifiche*

CAP. 2 – DIGHE DI MATERIALI SCIOLTI

- 2.1 Aspetti fenomenologici

- 2.2 Metodologie d'analisi
- 2.3 Indagini per l' accertamento dello stato di fatto
- 2.4 Valutazione della vulnerabilità sismica

2.4.1- Stati Limite

2.4.2- Analisi e verifiche

CAP. 3 – DIGHE DI MURATURA E DI CALCESTRUZZO

- 3.1. Aspetti fenomenologici
- 3.2. Metodologie d'analisi
- 3.3. Indagini per l' accertamento dello stato di fatto
- 3.4. Valutazione della vulnerabilità sismica

3.4.1- Stati Limite

3.4.2 - Combinazioni di carico

3.4.2.1 – Dighe a gravità

3.4.2.2 – Dighe a volta

- 3.5. Criteria e Metodi d'analisi

3.5.1- Analisi statiche lineari elastiche

3.5.2- Analisi dinamica lineare

3.5.3- Analisi statica non lineare

3.5.4- Analisi dinamica non lineare

- 3.6. Verifiche allo Stato Limite Ultimo

3.6.1- Stabilità allo scorrimento delle dighe a gravità e delle traverse

- 3.7. Verifiche allo Stato Limite di Funzionalità

CAP. 4– SCARICHI E OPERE COMPLEMENTARI E ACCESSORIE

- 4.1 Premessa

4.1.1 Aspetti fenomenologici

4.1.2 Metodi di analisi e di verifica

4.1.3 Indagini per accertare lo stato di fatto

- 4.2 Valutazione della vulnerabilità sismica

4.2.1 Stati limite

4.2.2 Analisi e verifiche

CAP. 5– STABILITA' DELLE SPONDE

- 5.1. Considerazioni generali

5.2. Indagini e accertamenti

5.3. Metodologie d'analisi

LINEE GUIDA PER LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE DIGHE IN ESERCIZIO

Scopo delle Linee guida

Le presenti disposizioni vengono emanate in applicazione dell'art. 4, comma 2 del D.L. 29.3.04, n. 79, convertito con Legge n. 139/04. Le verifiche, se effettuate con i criteri riportati nelle presenti linee guida, assolvono sia a quanto disposto dall'art. 4, comma 2 del D.L. 29.3.04, n. 79, sia a quanto previsto dall'art. 2, comma 3 dell'Ordinanza PCM 3274 del 20.3.03.

Campo di applicazione

Le presenti disposizioni si applicano a tutte le dighe presenti sul territorio nazionale aventi le caratteristiche di cui all'art.1 del D.L. n. 507/94 convertito con Legge n. 584/94.

Suddivisione delle dighe in relazione alle esigenze di protezione civile

Tutte le dighe aventi le caratteristiche di cui all'art. 1 del D.L. n. 507/94 convertito con Legge n. 584/94 sono considerate "opere che possono assumere rilevanza in relazione alle conseguenze di un eventuale collasso". Sono considerate anche "dighe di interesse strategico" quelle connesse con il funzionamento di acquedotti interregionali e la produzione di energia elettrica.

Prestazioni richieste

Le verifiche relative alle dighe sono finalizzate all'accertamento del requisito che, in caso di eventi sismici estremi, non si verifichi la perdita dell'azione di contenimento dell'acqua di invaso, né la perdita di funzionalità degli organi necessari allo svuotamento controllato del serbatoio. Per le "dighe di interesse strategico" le verifiche sono finalizzate inoltre all'accertamento del requisito che, in caso di eventi a minore periodo di ritorno, gli eventuali danneggiamenti siano compatibili con il mantenimento in esercizio dell'opera. Tali requisiti si considerano soddisfatti se sono effettuate con esito positivo le verifiche secondo le indicazioni riportate nelle presenti Linee guida.

Programma temporale delle verifiche

I Concessionari ovvero i richiedenti la concessione o i soggetti che a qualunque titolo esercitano una diga, ai sensi dell'art. 4 comma 3 del D.L. 29.3.04 n. 79, sono tenuti a valutare la sicurezza sismica delle dighe da essi gestite; dette verifiche devono essere trasmesse al Registro italiano dighe per la relativa approvazione. Il Registro italiano dighe richiede, qualora dai risultati delle verifiche effettuate risulti necessario, la redazione di un progetto degli interventi per l'incremento delle condizioni di sicurezza delle opere.

CAPITOLO 1 - GENERALITA'

1.1 Introduzione

L'impianto di ritenuta o serbatoio è un sistema costituito dall'insieme dello sbarramento (diga o traversa) – intesa come struttura di ritenuta dell'acqua comprensiva delle opere di scarico - delle opere complementari ed accessorie, dei pendii costituenti le sponde e dell'acqua invasata.

L'accumulo di grandi volumi d'acqua, che potrebbero defluire in modo rapido e incontrollato, deve essere sempre considerato come un potenziale fattore di rischio per la pubblica incolumità e anche per le conseguenze sul territorio in termini economici, ambientali e produttivi.

Sebbene terremoti avvenuti in zone sismiche, anche ad alta attività, abbiano sinora evidenziato un comportamento generalmente soddisfacente delle dighe, per esse devono comunque essere adottate precauzioni superiori a quelle riservate alle costruzioni ordinarie, in quanto il collasso di una diga ha sempre conseguenze molto gravi. Comunque, anche in assenza di collasso, la presenza di danni sismici rilevanti può comportare la messa fuori esercizio dell'impianto di ritenuta per molti anni, con conseguenti ingenti oneri di ripristino.

In base a recenti disposizioni (decreto del capo dipartimento della Protezione Civile del 21 ottobre 2003) le dighe rientrano nella categoria delle "opere strategiche" quando sono connesse al funzionamento di acquedotti interregionali o ad impianti di produzione di energia elettrica, e, comunque, rientrano sempre tra le "opere rilevanti per le conseguenze di un loro collasso" qualunque sia l'utilizzazione.

E' necessario, quindi, valutare la sicurezza di un impianto di ritenuta soggetto ad azioni sismiche, sia nei confronti del collasso, inteso come perdita incontrollata della capacità di contenimento dell'acqua, sia nei confronti del danno, inteso come perdita della funzione per la quale l'opera è stata realizzata.

L'analisi di sicurezza e di funzionalità di una diga esistente si basa comunque sull'esame delle effettive condizioni dell'opera e sulla determinazione delle potenziali azioni sismiche cui l'opera può essere soggetta. Tali elementi, congiuntamente alla definizione delle prestazioni richieste, costituiscono il punto di partenza per la rivalutazione della sicurezza e della funzionalità sismiche (di seguito sinteticamente definita come "valutazione o rivalutazione sismica").

Gli orientamenti della normativa internazionale al riguardo suggeriscono un approccio deterministico, con il quale si valuta quantitativamente, con strumenti analitici e numerici, la reale risposta delle strutture a terremoti di elevata o media intensità.

Tuttavia, occorre tenere presente che la risposta di una struttura ad azioni estreme, che impegnano i materiali ben oltre il campo lineare, è tanto più complessa da analizzare quanto più si voglia approssimare in modo accurato il reale fenomeno fisico.

Modelli particolarmente accurati nella valutazione della risposta, quali quelli relativi ad analisi dinamiche in campo non lineare, possono essere utilizzati se si è in grado di definire in modo adeguato ed attendibile tutti i parametri dei modelli stessi. E' possibile utilizzare metodi di verifica meno impegnativi, che richiedono una definizione più semplice dei parametri del modello di comportamento, adottando adeguate cautele per tener conto della incertezza del modello stesso nella valutazione della risposta.

Questo documento ha lo scopo di fornire criteri per la valutazione della sicurezza sismica e della funzionalità sismica di tutte le dighe in esercizio esistenti sul territorio nazionale, anche se ancora oggetto di collaudo ai sensi dell'art. 14 del Regolamento Dighe approvato con DPR 1363/59 ed anche se già sottoposte a verifica ai sensi del DM LL.PP. 24.3.82 in sede di progetto o successivamente.

I criteri per le verifiche sismiche qui esposti sono validi anche per le opere di nuova costruzione.

Si potranno seguire anche metodi di analisi diversi da quelli proposti nelle presenti linee guida, purché comprovati ed in grado di garantire il raggiungimento degli obiettivi di sicurezza e di funzionalità di cui al successivo par. 1.2.

Nell'esposizione si forniscono indicazioni sulle metodologie di indagine, nonché di verifica, senza entrare nel dettaglio delle tecniche analitiche che possono rendersi necessarie nella valutazione della sicurezza delle dighe, sia nei confronti del collasso che della funzionalità.

Al fine della calibrazione di modelli di calcolo affidabili, risulta di notevole importanza l'interpretazione delle misure strumentali disponibili: la serie storica degli spostamenti, rotazioni, pressioni interstiziali, ecc. in funzione delle diverse condizioni di sollecitazioni esterne, fasi costruttive, livelli di invaso, temperature, pregressi eventi sismici, ecc.

Il documento si compone di cinque parti: il Cap.1 è di carattere generale e si riferisce a tutte le tipologie di dighe; il Cap.2 riguarda le dighe di materiali sciolti, il Cap.3 si riferisce alle dighe murarie; il Cap. 4 riguarda gli scarichi e le opere complementari e accessorie e il Cap.5 riguarda la stabilità delle sponde.

Per dighe murarie si intendono, ai fini delle presenti Linee guida, le dighe di calcestruzzo e le dighe di muratura di pietrame con malta.

1.2 La sicurezza e la funzionalità sismica dei serbatoi

1.2.1 Obiettivi di sicurezza delle dighe

Per la valutazione del comportamento dei serbatoi sotto l'azione sismica si definiscono le seguenti condizioni caratteristiche:

1. normale funzionamento;
2. danni riparabili, senza rilascio incontrollato di acqua;
3. danni non riparabili, senza rilascio incontrollato di acqua;
4. danni non riparabili, con rilascio incontrollato di acqua.

Il passaggio dalla condizione 1 alla condizione 2 definisce lo stato limite di danno (SLD).

Il passaggio dalla condizione 2 alla condizione 3 definisce lo stato limite ultimo (SLU).

Il passaggio dalla condizione 3 alla condizione 4 definisce lo stato limite di collasso (SLC).

Lo stato limite di danno deve essere considerato con riferimento ad eventi sismici relativamente frequenti, mentre gli stati limite ultimo e di collasso sono da riferire ad eventi sismici poco frequenti e rari, rispettivamente.

La valutazione della sicurezza sismica deve riguardare il serbatoio nel suo complesso; devono pertanto essere presi in considerazione tutti i componenti critici nei riguardi di ciascuno stato limite. Nel definire la criticità dei diversi componenti, particolare attenzione va posta nei confronti degli organi necessari per lo svaso. Anche un modesto danneggiamento della diga può infatti comportare la necessità di uno svaso rapido del serbatoio, ancorché temporaneo e/o per motivi precauzionali, e a tal fine deve essere garantita l'efficienza degli scarichi profondi (fondo e mezzofondo).

Ai soli fini delle verifiche sismiche per le dighe esistenti, si può ammettere che l'opera o qualcuno dei suoi componenti critici non soddisfino i requisiti dimensionali e costruttivi minimi e le prescrizioni di verifica del D.M. LL.PP. 24.03.82, purché siano effettuate con esito positivo tutte le analisi e le verifiche secondo le indicazioni riportate nelle presenti Linee guida.

1.2.2 Intensità delle azioni di progetto

La severità dell'azione sismica è quantificata dal periodo di ritorno, definito come il tempo medio cui corrisponde una prefissata probabilità di eccedenza in un prefissato periodo. Nella Tabella I sono riportati i valori del periodo di ritorno significativi per la valutazione della sicurezza dei serbatoi.

Tab. I – Periodi di ritorno dell'azione sismica.

Probabilità (%) di eccedenza in 50 anni	Periodo di ritorno (anni)
≤ 40	100
≤ 20	225
≤ 10	500
≤ 5	1000
≤ 2	2500

La severità dell'azione sismica da adottare nelle verifiche deve anche essere distinta secondo che si abbia a che fare con dighe strategiche o dighe non strategiche e, per ciascuna di queste categorie, con dighe esistenti o dighe di nuova costruzione (Tabella II)

Tab. II – Severità dell'azione sismica.

Categoria di diga	Costruzione	Periodo di ritorno (anni)		
		<i>SLD</i>	<i>SLU</i>	<i>SLC</i>
Strategica	Esistente	225	1000	2500
	Nuova	225	2500	>2500
Non strategica	Esistente	100	500	1000
	Nuova	100	1000	>2500

Poiché deve comunque essere possibile lo svuotamento della diga, il funzionamento degli organi di scarico di fondo e mezzofondo deve essere comunque garantito, nelle verifiche allo stato limite ultimo della diga gli organi di scarico profondi devono sempre soddisfare la condizione di stato limite di danno.

1.2.3 Definizione dell'azione sismica per le verifiche

L'azione sismica può essere descritta in termini di spettro di risposta elastico o, per analisi dinamiche non lineari, di accelerogrammi compatibili con gli spettri di riferimento.

In assenza di specifici studi sismotettonici, si possono assumere eventi di riferimento – in termini di spettri di risposta elastica o di accelerogrammi spettrocompatibili – ottenuti con analisi probabilistiche di pericolosità sismica, riferiti ad un sito rigido pianeggiante e caratterizzati dai periodi di ritorno precedentemente indicati.

Se l'opera è situata su terreni compressibili e/o a morfologia complessa, è necessario valutare le modificazioni locali dell'azione sismica, in termini di ampiezza e di frequenza.

Per le dighe strategiche ubicate in 1^a zona sismica è auspicabile lo studio sismotettonico di dettaglio del sito e la valutazione di faglie attive presenti che possano dar luogo a spostamenti relativi dell'imposta della diga.

CAP. 2 – DIGHE DI MATERIALI SCIOLTI

2.1 Aspetti fenomenologici

Terremoti intensi possono provocare vari tipi di danneggiamento alle dighe di materiali sciolti, siano esse del tipo zonato, in rockfill con manto di tenuta od omogenee. I fenomeni osservati in occasione di eventi di forte intensità sono i seguenti.

- Instabilità dei paramenti, che si manifesta con scorrimenti superficiali o profondi, che possono coinvolgere anche le fondazioni. Può essere anche associata a fenomeni di liquefazione nel rilevato o nei terreni di fondazione. L'effetto principale è il crollo dell'opera o la riduzione o l'annullamento del franco con il rischio che la diga venga tracimata.
- Spostamenti differenziali, con manifestazione di fratture pericolose per la tenuta, che possono essere indotti da una riduzione di volume del rilevato o dei terreni di fondazione. Il franco può risultarne ridotto e possono innescarsi fenomeni di erosione interna. Sotto questi aspetti, sono a maggior rischio le dighe con nuclei sottili e senza adeguati filtri.
- Danneggiamenti delle opere accessorie e degli scarichi, con particolare riferimento a quelli che attraversano il corpo diga, realizzati in vigenza di precedenti normative tecniche, in particolare delle opere di scarico che attraversano il corpo diga. Durante un terremoto, la rottura delle tubazioni può determinare il rilascio di acqua all'interno del rilevato, compromettendo l'integrità della diga. La perdita di funzionalità di un'opera di scarico (inclusa quella dei suoi organi di manovra-valvole e paratoie) può rendere difficile lo svuotamento del serbatoio. La strumentazione di controllo può andare fuori uso. Le vie di accesso possono essere danneggiate.
- Fratturazione dei terreni di fondazione e delle opere di impermeabilizzazione in fondazione (schermi). Si possono verificare fenomeni di aumento delle portate filtranti e dei gradienti di filtrazione, fenomeni di erosione e sifonamento.

2.2 Metodologie d'analisi

Le analisi della risposta sismica di una diga di materiali sciolti devono essere precedute dalla determinazione delle azioni sismiche di riferimento, in termini di parametri significativi del moto sismico atteso su affioramento rigido, e di risposta del sito alle azioni suddette.

Le analisi devono riguardare la stabilità dei manufatti e dei terreni, la valutazione del campo di spostamenti e, più in generale, l'interazione tra corpo diga e terreno circostante.

Le procedure di calcolo possono fare riferimento a metodi pseudostatici, ad analisi dinamiche semplificate e ad analisi dinamiche complete.

2.3 Indagini per l'accertamento dello stato di fatto

La predisposizione del piano degli accertamenti e delle indagini per identificare le condizioni attuali della diga deve tener conto dei dati acquisiti nelle fasi di progetto e di costruzione, nonché dei risultati progressivamente acquisiti tramite la strumentazione di controllo.

In base a tale preliminare quadro delle conoscenze, devono essere programmate indagini integrative, indirizzate alla caratterizzazione geotecnica dei materiali costituenti il corpo diga e i terreni di fondazione

e d'imposta, con specifico riferimento alle metodologie d'analisi previste per la valutazione della vulnerabilità sismica.

Per le verifiche di stabilità dei paramenti assume interesse preminente la valutazione dei parametri di resistenza nelle condizioni di picco, post picco e residue. Le indagini debbono essere orientate a tal fine e devono anche permettere la valutazione del potenziale di liquefazione dei terreni.

Per le analisi dinamiche è necessario valutare la rigidità iniziale dei materiali e le leggi di decadimento della rigidità al crescere del livello di deformazione. Allo stesso fine, è altresì necessario valutare le caratteristiche di smorzamento dei materiali.

Indagini e prove più complesse devono essere previste, se necessario, per la calibrazione di modelli costitutivi avanzati, da impiegare in analisi dinamiche complete.

2.4 Valutazione della vulnerabilità sismica

2.4.1 Stati limite

Gli stati limite da considerare nella valutazione della vulnerabilità sismica di una diga di materiali sciolti sono:

1. instabilità globale del corpo diga e dei terreni d'imposta;
2. instabilità dei paramenti;
3. liquefazione del corpo diga e dei terreni di fondazione;
4. lesioni nel corpo diga, nei terreni di fondazione o nelle superfici di contatto manufatto terreno, tali da provocare una filtrazione incontrollata;
5. eccessive deformazioni del corpo diga e dei terreni di fondazione, tali da causare la tracimazione;
6. fratturazione dell'elemento di tenuta idraulica in fondazione;
7. tracimazione della diga per eccessiva crescita del livello d'invaso a causa di fenomeni d'instabilità delle sponde o delle spalle.

2.4.2 Analisi e verifiche

Per le verifiche di sicurezza e di funzionalità delle dighe di materiali sciolti sono possibili diversi strumenti d'analisi, di crescente complessità, e tali da richiedere specifiche indagini geotecniche, anch'esse di crescente complessità. Si individuano al riguardo i seguenti metodi di analisi e verifica:

1. I metodi cosiddetti pseudostatici considerano le azioni sismiche come un insieme di forze equivalenti, agenti staticamente sul corpo diga o sul suo contorno. I metodi pseudostatici possono essere impiegati per le verifiche di stabilità dei paramenti, prefissando le potenziali superfici di scivolamento e impiegando i metodi dell'equilibrio limite. Questi metodi richiedono la definizione dei coefficienti sismici orizzontale e verticale, i cui valori possono essere ricavati in ciascun punto del corpo diga con sufficiente approssimazione mediante un'analisi dinamica lineare equivalente d'interazione manufatto-terreno. Nell'analisi è necessario considerare la presenza del terreno di fondazione della diga soprattutto nei casi in cui siano prevedibili apprezzabili effetti di amplificazione locale di origine stratigrafica.
2. I metodi dinamici portano esplicitamente in conto l'azione sismica; questa, per le dighe di materiali sciolti, deve essere espressa in forma di accelerogrammi che possono derivare da specifici studi sismologici o che siano compatibili con spettri di normativa.

- a-I metodi dinamici approssimati si qualificano come tali poiché assumono una forma semplificata, di tipo lineare equivalente, delle relazioni sforzi-deformazioni dei terreni. Per una valutazione sufficientemente realistica del campo di accelerazioni nel manufatto, tali metodi permettono di tener conto della presenza di fenomeni di plasticità diffusa mediante una progressiva riduzione della rigidità al crescere del livello di deformazione. Le analisi che fanno riferimento a questi metodi non considerano l'interazione tra le fasi costituenti una terra e sono pertanto svolte in termini di tensioni totali.
- b- I metodi dinamici completi permettono di svolgere analisi in termini di tensioni efficaci, considerando la presenza del fluido interstiziale, e fanno riferimento a modelli elastoplastici con incrudimento, idonei a simulare le sollecitazioni cicliche. I più recenti e convincenti di tali modelli permettono anche di portare in conto gli effetti della non saturazione dei terreni.

Nelle verifiche di stabilità dei paramenti, un'analisi dinamica semplificata può essere effettuata impiegando il metodo di Newmark che permette una valutazione di prima approssimazione dello spostamento del volume di terreno che si è mosso lungo una prefissata superficie di scivolamento, al termine della scossa sismica.

Nel caso di terremoto severo, le verifiche di stabilità dei paramenti devono essere accompagnate da verifiche di sicurezza nei confronti della tracimazione quando dai risultati delle indagini la diga risulti realizzata con materiali che, per costituzione o modalità di posa in opera, siano suscettibili di degrado delle caratteristiche meccaniche per effetto delle azioni cicliche. A questo scopo, è necessario valutare le deformazioni permanenti del manufatto effettuando un'analisi dinamica completa che tenga conto dello sviluppo di deformazioni irreversibili e dell'interazione tra le fasi solida e liquida nel terreno.

La presenza di materiali scarsamente addensati e saturi, nel corpo diga o nel terreno di fondazione, richiede anche la valutazione del potenziale di liquefazione e le corrispondenti verifiche.

Nel caso di dighe strategiche è sempre richiesta un'analisi dinamica per verificarne la funzionalità in occasione di terremoto relativamente frequente. La scelta del tipo di analisi, semplificata o completa, dipende sia dal tipo, frequente o raro, dell'azione sismica considerata, sia dalle caratteristiche geotecniche, più o meno buone, dei materiali presenti.

CAP. 3 – DIGHE MURARIE

3.1 Aspetti fenomenologici

Le dighe murarie hanno mostrato in passato un buon comportamento all'azione sismica.

Sulle dighe di muratura e di calcestruzzo è stata riscontrata una vulnerabilità relativamente modesta, più specificamente sulle dighe ad arco non è stato riscontrato alcun danno particolarmente significativo e qualche danno modesto è stato riscontrato nelle dighe a gravità ed in quelle sostenute da contrafforti; queste ultime sono risultate talvolta sensibili alle azioni perpendicolari ai contrafforti.

I principali danneggiamenti da attendersi nel corpo diga, stante il modesto valore delle tensioni di compressione tipico di queste opere, sono da ricercare nelle fessurazioni per trazione ed in fenomeni di scorrimento su piani preferenziali anche per la presenza delle pressioni dell'acqua. Va inoltre tenuto presente che l'invecchiamento può portare al degrado dei leganti in particolare nelle dighe di muratura; peraltro possono presentarsi diminuzioni di qualità dei materiali anche nelle dighe di calcestruzzo.

Dal punto di vista della risposta sismica si osserva che questa, rispetto alle dighe di materiali sciolti, è più legata al comportamento lineare, stante i modesti livelli tensionali di cui si è già detto, salvo gli effetti della

fessurazione per trazione che potrebbero innescare piani di scorrimento o di ribaltamento, in particolare nelle dighe a gravità. Le usuali geometrie portano in genere ad escludere meccanismi di ribaltamento. Fenomeni di crisi locale a compressione possono verificarsi in genere a seguito di aperture di lesioni dovute a fessurazioni per trazione.

Una ulteriore differenza rispetto a quanto si può osservare nelle dighe di materiali sciolti è l'effetto della interazione con il bacino d'acqua che nelle dighe murarie può risultare significativo, potendo dar luogo a variazioni della risposta significative tra i casi di serbatoio vuoto e pieno.

E' inoltre necessario valutare la stabilità globale o parziale dell'opera ed il possibile caso di cinematismi che possono coinvolgere l'ammasso roccioso di fondazione.

3.2 Metodologie d'analisi

Le analisi della risposta sismica di una diga muraria devono essere precedute dalla determinazione delle azioni sismiche di riferimento, in termini di parametri significativi del moto sismico atteso su affioramento rigido e in termini di risposta del sito alle azioni suddette.

Le analisi devono riguardare la stabilità dei manufatti e dei terreni, la valutazione del campo di spostamenti e, più in generale, l'interazione tra corpo diga e terreno circostante.

Le procedure di calcolo possono fare riferimento a metodi pseudostatici, ad analisi dinamiche semplificate e ad analisi dinamiche complete.

3.3 Indagini per l'accertamento dello stato di fatto

La predisposizione del piano degli accertamenti e delle indagini per identificare le condizioni attuali della diga deve tener conto dei dati acquisiti nelle fasi di progetto e di costruzione, nonché dei risultati progressivamente acquisiti tramite la strumentazione di controllo.

In base a tale preliminare quadro delle conoscenze, devono essere programmate indagini integrative, indirizzate alla caratterizzazione dei materiali costituenti il corpo diga e i terreni di fondazione e d'imposta, con specifico riferimento alle metodologie d'analisi previste per la valutazione della vulnerabilità sismica.

Si dovranno accertare, mediante prove in sito ed in laboratorio su campioni prelevati dal corpo diga, le caratteristiche dei materiali componenti e la loro variabilità nell'ambito del corpo diga stesso, ricostruendo la situazione di fatto. I parametri ricavati indirettamente con prove non distruttive, saranno correlati a misure dirette ottenute sui campioni. Si individueranno le linee di eventuali fessure significative presenti, misurando anche, se del caso, le pressioni dell'acqua in particolare nelle zone di imposta della diga.

Si indagherà anche lo stato delle eventuali armature, dei giunti ed eventuali organi di tenuta. Nelle dighe di muratura di pietrame si valuterà lo stato di consistenza dei blocchi e delle malte.

I livelli di approfondimento delle indagini dovrà essere adeguato allo stato di conservazione della diga e tale da consentire la messa a punto di modelli di verifica sufficientemente accurati e al fine di accertare le cause di comportamenti anomali, riconducendole a improprie scelte progettuali o a difetti costruttivi, ovvero a cause sopravvenute nel corso dell'esercizio. Pertanto indagini e prove più complesse devono essere previste, se necessario, per la calibrazione di modelli costitutivi avanzati, da impiegare in analisi dinamiche complete.

Per le analisi dinamiche è necessario valutare la rigidità dei materiali ed il loro grado di fessurazione e, se possibile, la rigidità della stessa struttura e lo smorzamento anche indotto dall'interazione con la fondazione.

E' infine senza dubbio utile valutare sperimentalmente il livello tensionale locale.

3.4 Valutazione della vulnerabilità sismica

3.4.1 Stati limite

Gli Stati limite da considerare nella valutazione della vulnerabilità sismica di una diga muraria sono:

1. instabilità globale del corpo diga e dei terreni e/o ammassi rocciosi d'imposta (per le dighe a volta);
2. instabilità del corpo diga per eccessivo scorrimento a seguito di apertura di lesioni (in strati di malta o ripresa di getto o fessure, al contatto diga roccia, nei giunti di fondazione ecc, essenzialmente nelle dighe a gravità);
3. crisi di meccanismi locali (essenzialmente dighe a volta ed a contrafforti)
4. lesioni nel corpo diga, nei terreni di fondazione o nelle superfici di contatto manufatto terreno, tali da provocare una filtrazione incontrollata;
5. rottura dell'elemento di tenuta idraulica nei giunti;
6. tracimazione della diga per eccessiva crescita del livello d'invaso a causa di fenomeni d'instabilità delle sponde o delle spalle;
7. collasso o danno degli organi di scarico e in generale delle opere accessorie, che possano generare gravi conseguenze a causa dell'impossibilità di regolare la quota d'invaso.

Lo stato limite di collasso si ha quando si verifica uno o più degli stati limite di cui ai punti 1, 3, 7 precedentemente indicati ed i restanti quando causano la perdita non controllata dell'acqua invasata.

Lo stato limite di danno si ha quando si verifica una (o più) delle seguenti condizioni:

1. eccesso tensionale nel corpo diga
2. eccesso di sollecitazione nella fondazione
3. eccesso di deformazioni nei giunti
4. danneggiamento degli organi di scarico superficiale o profondo
5. danno delle opere di presa
6. danno ai sistemi di misura e controllo

3.4.2 Combinazioni di carico

I carichi elementari da considerare sono i seguenti:

- peso proprio;
- spinta idrica a monte con livello pari a quello massimo possibile;
- spinta idrica a valle (livello idrico più gravoso);
- spinta del ghiaccio (valutata sulla base di specifiche ed attendibili misure o, in assenza, secondo i criteri di cui al D.M. 24/03/1982) e di eventuali sedimenti a monte;
- azioni di origine termica (valutate in base alle temperature misurate);
- azioni sismiche (dovute alla massa della struttura, all'acqua di invaso e agli eventuali sedimenti a monte).

I valori delle azioni da combinare con le azioni sismiche sono quelle relativi ai valori quasi statici. Gli effetti della temperatura e le azioni del ghiaccio dovranno essere considerate solo per le dighe nelle quali tali effetti si protraggono per una durata considerevole nell'arco dell'anno, e saranno anch'essi riferiti a valori che hanno una significativa probabilità di accadere in concomitanza con l'azione sismica. (a tal fine è utile riferimento l'Eurocodice EN 1990).

In base ai carichi elementari, si definiscono le seguenti combinazioni di carico in presenza del sisma, rispettivamente per le dighe a gravità e a volta:

3.4.2.1 Dighe a gravità

- 1) a pieno: peso proprio, pressione idrica a monte con livello al massimo invaso, pressione idrica a valle, spinta del ghiaccio (qualora sia presente per oltre il 20% dell'anno) e dei sedimenti a monte, azioni sismiche;
- 2) a vuoto: come sopra ad eccezione della pressione idrica.

Per le dighe a gravità alleggerita (a speroni o a vani interni) deve essere valutata la concomitanza delle azioni termiche valutate con criteri adeguati a renderne elevata la possibilità che si verifichino in concomitanza con l'azione sismica.

2) a vuoto: come sopra ad eccezione della pressione idrica.

Per le dighe a gravità alleggerita (a speroni o a vani interni) deve essere valutata la concomitanza delle azioni termiche.

3.4.2.2 Dighe a volta:

1) a pieno: peso proprio, pressione idrica a monte con livello al massimo invasore, pressione idrica a valle, spinta del ghiaccio (con l'osservazione di cui alle dighe a gravità) e dei sedimenti a monte, azioni di origine termica, azioni sismiche;

2) a vuoto: come sopra ad eccezione della pressione idrica.

3.5 Criteri e Metodi di Analisi

Facendo riferimento essenzialmente al corpo diga ed alle sue fondazioni, per le verifiche di sicurezza e di funzionalità delle dighe murarie sono possibili diversi strumenti d'analisi, di crescente complessità, e tali da richiedere specifiche indagini, anch'esse di crescente complessità.

I metodi cosiddetti pseudostatici considerano le azioni sismiche come un insieme di forze equivalenti, agenti staticamente nel corpo diga o sul suo contorno. Essi si possono basare solo su concetti di equilibrio, ad esempio in molti casi di dighe a gravità, o anche tener conto della deformabilità della diga e della fondazione (dighe a volta e a speroni). Le azioni da applicare richiedono la definizione di coefficienti sismici orizzontali e verticali che dipendono dalla risposta dinamica della diga incluso il terreno. Essi possono essere impiegati una volta individuati possibili meccanismi di scivolamento e ribaltamento che coinvolgono o meno il terreno di fondazione.

I metodi dinamici portano esplicitamente in conto l'azione sismica; questa, nel caso di analisi lineari, può essere espressa in termini di spettro di risposta o di accelerogrammi. L'azione può derivare da specifici studi sismologici, e deve comunque tener conto delle indicazioni delle presenti Linee guida.

Nel caso di terreni di imposta sollecitati sino a livelli tali da indurne il comportamento non lineare, qualora si adottino modelli lineari equivalenti, si dovrà dare giustificazione delle scelte effettuate anche sulla base delle prove, in sito e/o di laboratorio, dirette o indirette. Per i problemi più strettamente legati a fondazioni su terreni anziché su roccia, caso piuttosto raro in questo tipo di opere, si rimanda allo specifico capitolo relativo alle dighe di materiali sciolti.

Le analisi utilizzate per la verifica sismica di dighe esistenti possono fare riferimento ad ipotesi di vario tipo nei riguardi del metodo di calcolo (statico, dinamico), delle leggi costitutive dei materiali (lineari, non lineari), della geometria (piana o tridimensionale), delle metodologie di calcolo (elementi finiti, differenze finite, elementi di frontiera, elementi distinti). Salvo particolari e motivate giustificazioni, generalmente non è ammessa la sovrapposizione degli effetti valutati con modelli di calcolo differenti.

L'effetto della interazione con l'acqua di invasore dovrà essere considerato e discusso nel modello adottato.

3.6 Verifiche allo Stato Limite Ultimo

Si possono adottare criteri di verifica con diversi livelli di accuratezza nelle verifiche semplificate sino a molto complesse, perché più vicine alla realtà fisica del fenomeno. Il percorso è funzione del soddisfacimento dei criteri di accettazione, che dipendono dal livello di verifica. Nella presentazione dei risultati delle rivalutazioni sismiche è opportuno che vengano documentati tutti i livelli dell'analisi che è stato necessario esplorare fino a giungere al giudizio conclusivo. Quando si effettua una valutazione

quantitativa della sicurezza sismica è richiesta, oltre che la valutazione dell'opera nei confronti delle azioni sismiche attese, anche la stima dell'azione sismica massima che la diga può sopportare.

Quando si ipotizza un comportamento lineare dei materiali in campo statico o dinamico, la massima tensione di compressione deve risultare inferiore alla resistenza caratteristica che può essere stimata per l'opera, opportunamente ridotta per tener conto delle incertezze presenti nella conoscenza del materiale in opera. Una stima di riferimento è la resistenza cilindrica divisa per un coefficiente parziale pari ad 1.6 senza tener conto di ulteriori riduzioni per i carichi di lunga durata.

Si dovrà assumere resistenza a trazione nulla nei giunti e nelle discontinuità (riprese di getto, lesioni e fessure, muratura di pietrame e malta, giunti in roccia). Qualora sia possibile escludere la fessurazione prima dell'evento di verifica, si potrà tener conto di una resistenza a trazione con la quale verificare l'innescio dei meccanismi di collasso. Essa potrà basarsi su una opportuna stima della resistenza a trazione misurata sperimentalmente, adeguatamente ridotta. Rappresenta un utile riferimento la resistenza a trazione per flessione per stimare la resistenza caratteristica, ridotta di un coefficiente parziale non inferiore a 1.6. Si dovrà considerare nell'equilibrio l'effetto della pressione dell'acqua nel corpo diga ed in particolare nelle lesioni.

I parametri di resistenza al taglio dell'ammasso roccioso di fondazione, dei giunti e delle superfici di discontinuità, devono essere congruenti con le caratteristiche dei materiali, e caratterizzati sulla base dei sistemi di classificazione correntemente adottati.

E' necessario anche verificare, per le dighe a gravità, che gli spostamenti relativi tra i vari elementi siano compatibili con le ampiezze medie dei giunti, mentre, per le dighe a volta, è necessario verificare che gli sforzi in corrispondenza dei giunti siano compatibili con la resistenza disponibile, in modo da mantenere un comportamento monolitico della diga.

Dighe che presentano fenomeni fessurativi possono essere ancora trattate con questo tipo di analisi, a condizione di controllare che gli sforzi in corrispondenza delle superfici delle fessure siano compatibili con la resistenza disponibile.

Quando si effettua un'analisi statica in campo non lineare il comportamento dei materiali e delle interfacce (sia quelle previste in progetto che quelle provocate da fenomeni fessurativi importanti) deve essere modellato motivando adeguatamente i parametri di resistenza adottati, anche alla luce di specifiche indagini.

Il criterio di accettazione si basa sul controllo di deformazioni e di spostamenti. In sostanza, data la non linearità di comportamento del materiale, sono accettate plasticizzazioni locali e ridistribuzioni all'interno della struttura, purché non si raggiunga una condizione di collasso globale dell'opera. Gli spostamenti previsti dal modello devono essere confrontati con quelli compatibili con il mantenimento del requisito di contenimento dell'acqua.

Quando si effettua un'analisi dinamica in campo non lineare il comportamento dei materiali e delle interfacce (sia quelle previste in progetto che quelle provocate da fenomeni fessurativi importanti) deve essere modellato motivando adeguatamente i parametri di resistenza adottati, anche alla luce di specifiche indagini.

Il criterio di accettazione si basa sugli stessi controlli deformativi e di spostamenti descritti in precedenza per le analisi statiche non lineari.

3.6.1 Stabilità allo scorrimento delle dighe a gravità e delle traverse

In aggiunta alle verifiche tensionali e deformative, per le dighe a gravità e le traverse deve anche essere valutata la sicurezza allo scorrimento.

Per le dighe a gravità e le traverse, la sicurezza allo scorrimento può essere valutata con una analisi pseudostatica confrontando le forze resistenti e le forze agenti sulla superficie di verifica assunta

all'interno della diga, al contatto di questa con le fondazioni e lungo eventuali giunti e fratture presenti nel corpo della diga e nella roccia.

Le forze sismiche di taglio parallele alla superficie di verifica devono essere valutate riducendo opportunamente i valori che si otterrebbero con una analisi dinamica elastica lineare.

Particolare attenzione deve essere posta nella stima della risposta, ed appare sempre opportuno eseguire analisi parametriche, facendo variare i parametri meccanici utilizzati sia di resistenza che di rigidità.

Verifiche allo scorrimento devono anche essere condotte in fondazione e sulle spalle in presenza di cinematismi di scorrimento potenzialmente sfavorevoli alla stabilità dell'opera. A tal fine è necessario individuare le principali famiglie di discontinuità in fondazione, caratterizzare l'ammasso roccioso ed i relativi giunti, identificare i possibili cinematismi di instabilità.

Nei casi di maggior complessità, può essere utile ricorrere a modelli ad elementi finiti. Si può valutare lo scorrimento, in campo dinamico non lineare. Anche in questo caso una analisi parametrica dell'influenza delle diverse scelte costituisce utile strumento di giudizio.

La verifica ha esito positivo se, anche in presenza di scorrimenti permanenti, è garantita l'azione di contenimento dell'acqua.

3.7 Verifiche allo Stato Limite di Funzionalità

Verifiche di funzionalità hanno lo scopo di determinare gli effetti tensionali e deformativi causati dall'azione sismica, di correlarli al danno e di valutare che tale stato di danno sia compatibile con il requisito di operatività dell'opera.

CAP. 4 - SCARICHI E OPERE COMPLEMENTARI E ACCESSORIE

4.1 Premessa

Gli scarichi e le opere complementari e accessorie della diga (scarichi di superficie, scarichi profondi, loro organi di intercettazione e movimentazione e strumentazione di controllo) devono essere considerati tra i componenti nella rivalutazione sismica delle dighe, al fine di individuare, secondo quanto illustrato al punto 1.2.2 delle presenti Linee guida, se essi sono componenti critici. In particolare è da valutare se il mancato funzionamento, il danneggiamento o la rottura di essi può portare alla perdita di controllo dell'invaso o di funzionalità del serbatoio.

In particolare deve essere garantita, come minimo, l'operatività degli scarichi profondi.

4.1.1 Aspetti fenomenologici

Le tipologie dei danni agli scarichi sono variabili da opera ad opera

- Gli scarichi di superficie, a volte di geometria complessa (ad esempio calici, sifoni, ecc.), possono subire danneggiamenti a seguito delle deformazioni imposte dal terreno.
- Le paratoie, a seguito di deformazioni eccessive, superiori alle tolleranze meccaniche disponibili nelle parti mobili, possono causare il blocco degli organi di scarico. Il funzionamento regolare delle paratoie dipende dall'efficienza di molti componenti quali: strade, gallerie e ponti di accesso, impianto oleo-dinamico, fonti di energia e cavidotti, edifici che ospitano gli impianti di sicurezza, ecc., nonché dai singoli componenti delle paratoie stesse quali gargamature, ancoraggi, contrappesi, ecc., il cui malfunzionamento può provocare l'inefficienza dello scarico.
- Per lo scarico di superficie occorre considerare che, in aggiunta al carico idraulico, le forze inerziali indotte dal sisma possono provocare l'instabilità meccanica del sistema di paratoie, ciò in

particolare per impianti a funzionamento automatico. Se lo scarico si trova sul coronamento occorre considerare gli effetti di amplificazione del moto provocato dalla risposta dinamica della diga.

- Le gallerie degli scarichi possono avere una funzione importante per la sicurezza della diga perché in alcuni casi devono consentire lo svuotamento del serbatoio per motivi precauzionali o per consentire ispezioni. In aggiunta, le opere di derivazione e di presa possono avere una funzione strategica per l'approvvigionamento idrico a fini potabili o antincendio. Essendo opere di elevato sviluppo longitudinale, una particolare attenzione va riservata ai movimenti differenziali sia in senso trasversale che longitudinale.
- La rottura di condutture e il conseguente rilascio di acqua può investire strutture essenziali per la sicurezza della diga (critiche), devono essere previsti accorgimenti per allontanare le acque dalle strutture potenzialmente investite dalle acque.
- Deve essere attentamente valutata la criticità di gallerie, in pressione o non, e di quelle destinate all'accesso. Le gallerie non sono in genere strutture vulnerabili al sisma, ma occorre prestare particolare attenzione alle opere di imbocco, soggette ad ostruzioni di vario tipo, quali ad esempio la caduta di massi, l'ostruzione per frane, il collasso strutturale dovuto a sovrappressioni.
- Se la galleria attraversa una zona soggetta a movimenti differenziali (faglie, frane, paleofrane, presenza di terreni deformabili, passaggio tra terreni a rigidità diversa, innesti in opere rigide ecc.) è necessario considerare l'opportunità di realizzare provvedimenti locali in grado di assicurare la funzionalità dell'opera (ad es. adottando un rivestimento metallico o altro).
- Se una condotta attraversa il rilevato di una diga in materiali sciolti, possono nascere sollecitazioni e deformazioni eccessive a seguito della interazione terreno-struttura.
- La crisi dei sistemi meccanici, elettrici e strumentali può dar luogo alla perdita di funzionalità dei sistemi di intercettazione e controllo.

4.1.2 Metodi di Analisi e Verifica

Per le opere che possono rientrare tra quelle disciplinate dalle vigenti norme sismiche per le costruzioni, si possono adottare i criteri di verifica ivi considerati. Le azioni sismiche sono quelle definite nelle presenti Linee guida.

Per le opere che, per la loro specificità, non ricadono tra quelle già disciplinate dalle vigenti norme sismiche i metodi di verifica sono definiti nelle presenti Linee guida.

Nella valutazione dell'azione sismica di verifica si dovrà tenere conto della posizione dell'opera accessoria nell'ambito dell'invaso e del corpo diga. In particolare, si dovrà adeguatamente tener conto del fatto che l'opera si trovi sul corpo diga.

Quando lo scarico si trova sul corpo diga, qualora l'opera non modifichi, per caratteristiche di massa, rigidità e resistenza, la risposta del corpo diga stesso, si potrà considerare il moto sismico che agisce sullo scarico, quale risposta della diga in assenza di essa, e verificare lo scarico soggetto a tale moto.

Per strutture non direttamente fondate su terreno rigido, occorre considerare, nella valutazione del carico sismico, i possibili effetti di amplificazione dovute a condizioni di sito diverse o alla struttura sottostante.

Il progettista valuterà quale metodo di verifica adottare in relazione alle caratteristiche della struttura, dandone adeguata giustificazione.

La qualificazione per i dispositivi meccanici considerati critici deve essere effettuata, preferibilmente, sulla base di analisi e/o prove specifiche condotte su tavola vibrante.

Si descrivono, nel seguito, i metodi utilizzabili per la verifica della risposta sismica. Metodi alternativi possono essere utilizzati purché adeguatamente giustificati.

4.1.3 Indagini per accertare lo stato di fatto

La predisposizione del piano degli accertamenti e delle indagini per identificare le condizioni attuali degli scarichi deve tener conto dei dati acquisiti nelle fasi di progetto e di costruzione, a partire dai documenti progettuali, nonché dei risultati progressivamente acquisiti tramite la strumentazione di controllo.

In base a tale preliminare quadro delle conoscenze, devono essere programmate indagini, indirizzate alla caratterizzazione dei materiali costituenti gli elementi strutturali nonché i terreni di fondazione e d'imposta, con specifico riferimento alle metodologie d'analisi previste per la valutazione della vulnerabilità sismica.

Qualora sia necessario eseguire analisi della interazione terreno struttura, si rimanda a quanto indicato per le dighe di materiali sciolti.

Per quanto si riferisce alla valutazione delle caratteristiche dei materiali da costruzione utilizzati, si utilizzeranno criteri di indagine distruttive e non distruttive. Qualora si utilizzino analisi non lineari sia statiche che dinamiche, le caratteristiche di deformabilità, resistenza e smorzamento saranno derivate con indagini sia dirette che indirette. In particolare, sarà necessario giustificare i dati ricavati con prove non distruttive (in genere indirette) con un adeguato numero di prove distruttive su campioni opportunamente prelevati. Sarà discusso il criterio di passaggio dalle caratteristiche derivate nelle prove a quelle utilizzate per la verifica.

4.2 Valutazione della Vulnerabilità sismica

4.2.1 Stati Limite

Gli stati limite da verificare dipendono dalla singola opera costituente lo scarico e precisamente:

Scarichi

In genere è possibile ipotizzare che lo stato limite di funzionamento sia sempre verificato se è verificato lo stato limite di danno severo o di danno grave. Pertanto sono in genere da verificare solo gli stati ultimi e quindi quello di stato limite ultimo: SLU e di stato limite di collasso: SLC.

Qualora siano presenti elementi non strutturali necessari per il funzionamento dello scarico di superficie occorre individuarne le possibili cause di messa fuori servizio ed i criteri di verifica in relazione alle sollecitazioni localmente indotte dall'azione sismica, sia in termini di accelerazioni che di deformazioni. Le verifiche consisteranno quindi nel controllare che non si raggiungano i livelli di sollecitazioni che mettono fuori servizio tali elementi.

Paratoie

Eccesso di deformazione con conseguente blocco meccanico degli organi in movimento; messa fuori uso dei singoli componenti meccanici; instabilità meccanica delle paratoie.

Condutture e gallerie

Apertura di giunti tra i conci; rottura per effetto delle deformazioni indotte dal terreno; rilascio d'acqua a seguito del danneggiamento della condotta, in particolare nelle condotte in pressione.

Impianti

Messa fuori servizio a seguito di accelerazioni eccessive, per rottura interna o degli ancoraggi; messa fuori servizio a seguito di deformazioni imposte eccessive.

4.2.2 Analisi e verifiche

I metodi di analisi e verifica dipendono dalla tipologia dell'opera accessoria. In generale è possibile fare riferimento a quanto già indicato nei punti relativi alle dighe in materiali sciolti per quanto si riferisce ai problemi connessi alle opere in terra, ed alla interazione terreno struttura, a quanto detto nei punti relativi alle dighe in calcestruzzo e muratura ed a quanto previsto nelle normative per le costruzioni edilizie per le opere in calcestruzzo, cemento armato ed acciaio, ed in muratura.

Per le gallerie è in generale necessario considerare l'interazione con il terreno circostante, quando realizzate in terreni deformabili. A tal fine è usualmente sufficiente eseguire analisi approssimate ove viene impostata la galleria ed ad una adeguata porzione di terreno con la quale interagisce, le deformazioni del terreno nel quali si propaga il moto sismico, valutando separatamente le onde che producono movimenti ortogonali o paralleli all'asse della galleria.

Per le opere immerse in acqua è in genere indispensabile tenere conto del contributo dell'acqua almeno quale massa aggiunta alla massa della struttura.

La qualificazione sismica dei sistemi meccanici, elettrici e strumentali è essenziale per la funzionalità dei sistemi di intercettazione e controllo. La qualificazione per i dispositivi considerati critici deve essere effettuata sulla base di analisi e/o prove specifiche condotte su tavola vibrante.

CAP. 5 - STABILITA' DELLE SPONDE

5.1 Considerazioni generali

Fenomeni di instabilità delle sponde lungo i versanti che delimitano l'invaso possono essere causa di gravi disfunzionamenti dell'opera di sbarramento e degli organi di scarico nonché, in rapporto ai volumi mobilitati e alle velocità delle masse di terreno in movimento, di innalzamento del livello di invaso e di formazione di onde di piena, con rischio di tracimazione della diga.

Il comportamento delle sponde sotto l'azione sismica deve pertanto essere attentamente valutato individuando preliminarmente, anche con studi geomorfologici, le aree instabili o potenzialmente instabili e sottoponendo poi ad accertamenti ed analisi geotecniche le situazioni più critiche, con priorità alle aree di accertata instabilità.

Le verifiche di stabilità devono riguardare sia le condizioni statiche delle sponde, prima del sisma, sia le condizioni durante e dopo il sisma, quando possono ancora manifestarsi progressive variazioni del regime delle pressioni interstiziali e alterazioni dei parametri di resistenza.

5.2 Indagini ed accertamenti

Quale che sia il livello di approfondimento richiesto e il metodo di analisi conseguentemente adottato, ai fini della predisposizione del modello geotecnico è necessario accertare:

- le caratteristiche morfologiche e stratigrafiche del pendio e la presenza di eventuali discontinuità;
- le caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni, in condizioni statiche e dinamiche, con particolare riguardo alle caratteristiche di resistenza di picco, post picco e residue;
- il regime delle pressioni interstiziali;
- i caratteri cinematici del movimento, in caso di pendii in frana.

5.3 Metodologie d'analisi

Le condizioni di stabilità delle sponde possono essere valutate quantitativamente impiegando metodi pseudostatici e metodi di analisi dinamica (semplificata o avanzata).

Con i metodi pseudostatici il margine di sicurezza è valutato rispetto a una condizione di equilibrio limite, cioè a uno stato limite ultimo.

Con i metodi di analisi dinamica è possibile stimare le deformazioni indotte nel terreno dall'azione sismica e, quindi, gli spostamenti permanenti del pendio al termine della scossa. Tali metodi permettono un confronto tra valori ammissibili degli spostamenti e valori attesi per un dato evento sismico. Conseguentemente, possono essere effettuate verifiche riferite sia ad uno stato limite ultimo sia ad uno stato limite di danno.

Metodi pseudostatici

Nei metodi pseudostatici si fa comunemente riferimento ad un modello di tipo rigido-plastico per il terreno, con criterio di resistenza di Mohr-Coulomb o di Tresca, a seconda che l'analisi sia svolta in termini di tensioni efficaci o di tensioni totali (per terreni a grana fina in quest'ultimo caso). Ai fini di una corretta valutazione delle condizioni di stabilità, è necessario che i parametri di resistenza dei terreni siano determinati sperimentalmente sia nelle condizioni di picco, sia nelle condizioni di post picco e residue.

L'azione sismica è rappresentata da una forza d'inerzia statica equivalente, proporzionale al peso W della massa potenzialmente instabile, le cui componenti orizzontale e verticale sono state date dalle espressioni $F_h = k_h W$ e $F_v = k_v W$.

I valori dei coefficienti sismici k_h e k_v sono fissati dalla normativa. A questo proposito si deve osservare che, essendo l'azione sismica introdotta nell'analisi tramite una forza statica equivalente, l'accelerazione di calcolo $K \cdot g$ può essere anche notevolmente inferiore all'accelerazione massima del terremoto di progetto.

L'approccio pseudostatico può essere seguito adottando i metodi globali dell'equilibrio limite o i metodi delle strisce, il cui impiego richiede in genere il ricorso a codici di calcolo automatico.

I metodi pseudostatici non dovrebbero essere impiegati in presenza di terreni capaci di generare elevate sovrappressioni interstiziali o significativi fenomeni di degradazione sotto carichi ciclici.

Metodi dinamici

Tra i metodi dinamici è frequentemente seguito il metodo degli spostamenti. Si tratta di un approccio semplificato che si basa sul modello del blocco rigido di Newmark.

In tale approccio l'azione sismica è rappresentata da uno o più accelerogrammi, compatibili con la classificazione sismica della zona e con i relativi spettri di progetto, tenendo anche conto degli effetti stratigrafici e topografici locali.

Il metodo degli spostamenti prevede che la massa di terreno potenzialmente instabile si muova come un corpo rigido su una assegnata superficie di scorrimento tutte le volte che l'accelerazione superi un valore di soglia corrispondente al collasso incipiente ($F = 1$) e che il movimento si arresti quando l'accelerazione, cambiando di segno, induca una velocità relativa nulla tra il corpo di frana e il terreno sottostante. E' evidente come lo spostamento complessivo del corpo di frana dipende dal numero di volte in cui l'accelerazione superi il valore critico di soglia e dalla durata degli intervalli di tempo in cui tale condizione si manifesti.

Il confronto tra il valore dello spostamento complessivo e il valore dello spostamento ammissibile permette di valutare un indice di prestazione sismica del pendio.”

CONSIDERATO

Le Sezioni Riunite preliminarmente osservano che le “Linee Guida per la valutazione della sicurezza sismica delle dighe in esercizio” partono dalla impostazione concettuale secondo cui gli impianti di ritenuta sono costituiti dall'insieme dello sbarramento (diga o traversa), intesa come struttura di ritenuta

dell'acqua comprensiva delle opere di scarico, delle opere complementari ed accessorie, dei pendii costituenti le sponde e dell'acqua invasata.

Dalla lettura del documento in esame emerge che il comportamento delle dighe nelle zone sismiche, anche ad alta attività, viene giudicato generalmente soddisfacente. Tuttavia è giustamente messo in evidenza necessità di adottare precauzioni superiori a quelle riservate alle costruzioni ordinarie non solo in quanto il collasso di una diga presenta sempre conseguenze molto gravi, ma anche perché, pur in assenza di collasso, il verificarsi di danni sismici rilevanti, può comportare la messa fuori esercizio dell'impianto di ritenuta per molti anni, con conseguenti oneri di ripristino.

In tale visione delle problematiche riscontrate, si è ritenuto necessario valutare la sicurezza degli impianti di ritenuta soggetti ad azioni sismiche, sia nei confronti del collasso, inteso come perdita incontrollata della capacità di contenimento dell'acqua, sia nei confronti del danno, inteso come perdita della funzione per la quale l'opera è stata realizzata.

L'analisi di sicurezza e di funzionalità di una diga esistente viene basata sull'esame dell'effettive condizioni dell'opera e sulla valutazione delle potenziali azioni sismiche che potranno agire sull'opera.

La valutazione congiunta di tutti questi elementi, unitamente alla esatta definizione delle prestazioni richieste dall'opera, costituiscono il punto di partenza per la valutazione della sicurezza e della funzionalità sotto le azioni sismiche.

Le Linee Guida evidenziano che la risposta di un impianto di ritenuta ad azioni estreme, impegna i materiali oltre il campo lineare, rendendo necessaria un'analisi più complessa per poter approssimare in modo accurato il reale fenomeno fisico.

In dette analisi complesse, tuttavia, potranno essere utilizzati modelli particolarmente accurati nella valutazione della risposta, quali quelli relativi ad analisi dinamiche non lineari, unicamente qualora si sia in grado di definire in modo adeguato ed attendibile tutti i parametri dei modelli stessi.

Nei casi in cui tale determinazione parametrica non sia possibile, dovranno essere utilizzati metodi di verifica meno impegnativi richiedenti una più semplice definizione dei parametri del modello di comportamento, il che implica l'adozione di adeguate cautele in modo da tener conto della incertezza del modello stesso nella valutazione della risposta.

Le Sezioni rilevano che lo scopo precipuo delle Linee Guida è quello di fornire criteri per la valutazione della sicurezza e della funzionalità sismica di tutte le dighe in esercizio esistenti sul territorio nazionale, anche se ancora oggetto di collaudo ai sensi dell'art. 14 del Regolamento Dighe approvato con D.P.R. 1363/59 anche se già sottoposte a verifica ai sensi del D.M. LL.PP. 24/03/82 in sede di progetto o successivamente.

Entro tale ottica di esame, le Sezioni ritengono che al testo in esame siano da apportare alcune lievi modifiche chiarificatrici e non sostanziali in vari punti delle linee guida, tali che il testo finale del documento sia quello di seguito integralmente riportato:

LINEE GUIDA PER LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DELLE DIGHE IN ESERCIZIO

INDICE

1	GENERALITA'	24
1.1	INTRODUZIONE	25
1.2	LA SICUREZZA E LA FUNZIONALITÀ SISMICA DEI SERBATOI	26
1.2.1	Obiettivi di sicurezza delle dighe	26
1.2.2	Intensità delle azioni di progetto	27
1.2.3	Definizione dell'azione sismica per le verifiche	28
1.2.4	Interazione fluido-strutture	28
2	DIGHE DI MATERIALI SCIOLTI	28
2.1	ASPETTI FENOMENOLOGICI	28
2.2	METODOLOGIE D'ANALISI	29
2.3	INDAGINI PER L'ACCERTAMENTO DELLO STATO DI FATTO	29
2.4	VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA	29
2.4.1	Stati limite	29
2.4.2	Analisi e verifiche	30
3	DIGHE MURARIE	31
3.1	ASPETTI FENOMENOLOGICI	31
3.2	METODOLOGIE D'ANALISI	31
3.3	INDAGINI PER L'ACCERTAMENTO DELLO STATO DI FATTO	32
3.4	VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA	32
3.4.1	Stati limite	32
3.4.2	Combinazioni di carico	33
3.4.2.1	Combinazioni di carico per le dighe a gravità	34
3.4.2.2	Combinazioni di carico per le dighe a volta	34
3.5	CRITERI E METODI DI ANALISI	34
3.6	VERIFICHE AGLI STATI LIMITE ULTIMI	35
3.6.1	Stabilità allo scorrimento delle dighe a gravità e delle traverse	36
3.7	VERIFICHE AGLI STATI LIMITE DI ESERCIZIO	36
4	SCARICHI E OPERE COMPLEMENTARI E ACCESSORIE	36
4.1	PREMESSA	36
4.1.1	Aspetti fenomenologici	37
4.1.2	Metodi di Analisi e Verifica	37
4.1.3	Indagini per accertare lo stato di fatto	38
	VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA	38
4.2	38
4.2.1	Stati Limite	38
4.2.2	Analisi e verifiche	39
5	STABILITÀ DELLE SPONDE	40
5.1	CONSIDERAZIONI GENERALI	40

5.2 INDAGINI ED ACCERTAMENTI	40
5.3 METODOLOGIE D'ANALISI	40

Scopo delle Linee guida

Le presenti disposizioni vengono emanate in applicazione dell'art. 4, comma 2 del D.L. 29.3.04, n. 79, convertito con Legge n. 139/04. Le verifiche, se effettuate con i criteri riportati nelle presenti linee guida, assolvono sia a quanto disposto dall'art. 4, comma 2 del D.L. 29.3.04, n. 79, sia a quanto previsto dall'art. 2, comma 3 dell'Ordinanza PCM 3274 del 20.3.03.

Campo di applicazione

Le presenti disposizioni si applicano a tutte le dighe presenti sul territorio nazionale aventi le caratteristiche di cui all'art.1 del D.L. n. 507/94 convertito con Legge n. 584/94.

Suddivisione delle dighe in relazione alle esigenze di protezione civile

Tutte le dighe aventi le caratteristiche di cui all'art. 1 del D.L. n. 507/94 convertito con Legge n. 584/94 sono considerate "opere che possono assumere rilevanza in relazione alle conseguenze di un eventuale collasso". Sono considerate anche "dighe di interesse strategico" quelle connesse con il funzionamento di acquedotti interregionali e la produzione di energia elettrica.

Prestazioni richieste

Le verifiche relative alle dighe sono finalizzate all'accertamento del requisito che vengano rispettati gli stati limite ultimi quali definiti nel successivo § 1.2.1. Per le "dighe di interesse strategico" le verifiche sono finalizzate inoltre all'accertamento del requisito che vengano rispettati anche gli stati limite di esercizio quali definiti nel successivo § 1.2.1. Tali requisiti si considerano soddisfatti se le verifiche effettuate secondo le indicazioni riportate nelle presenti Linee guida hanno dato esito positivo.

Programma temporale delle verifiche

I Concessionari ovvero i richiedenti la concessione o i soggetti che a qualunque titolo esercitano una diga, ai sensi dell'art. 4 comma 3 del D.L. 29.3.04 n. 79, sono tenuti a valutare la sicurezza sismica delle dighe da essi gestite; dette verifiche devono essere trasmesse al Registro italiano dighe per la relativa approvazione. Il Registro italiano dighe richiede, qualora dai risultati delle verifiche effettuate risulti necessario, la redazione di un progetto degli interventi per l'incremento delle condizioni di sicurezza delle opere.

GENERALITA'

Il documento che segue si compone di cinque parti:

- il Cap.1 è di carattere generale e si riferisce a tutte le tipologie di dighe;
- il Cap.2 riguarda le dighe di materiali sciolti,

- il Cap.3 si riferisce alle dighe murarie;
- il Cap. 4 riguarda gli scarichi e le opere complementari e accessorie;
- il Cap.5 riguarda la stabilità delle sponde.

Introduzione

L'impianto di ritenuta o serbatoio è un sistema costituito dall'insieme dello sbarramento (diga o traversa) – intesa come struttura di ritenuta dell'acqua comprensiva delle opere di scarico - delle opere complementari ed accessorie, dei pendii costituenti le sponde e dell'acqua invasata.

L'accumulo di grandi volumi d'acqua, che potrebbero defluire in modo rapido e incontrollato, deve essere sempre considerato come un potenziale fattore di rischio per la pubblica incolumità e anche per le conseguenze sul territorio in termini economici, ambientali e produttivi.

Sebbene terremoti avvenuti in zone sismiche, anche ad alta attività, abbiano sinora evidenziato un comportamento generalmente soddisfacente delle dighe, per esse devono comunque essere adottate precauzioni superiori a quelle riservate alle costruzioni ordinarie, in quanto il collasso di una diga ha sempre conseguenze molto gravi. Comunque, anche in assenza di collasso, la presenza di danni sismici rilevanti può comportare la messa fuori esercizio dell'impianto di ritenuta per molti anni, con conseguenti ingenti oneri di ripristino.

In base a recenti disposizioni (decreto del capo dipartimento della Protezione Civile del 21 ottobre 2003) le dighe rientrano nella categoria delle “opere strategiche” quando sono connesse al funzionamento di acquedotti interregionali o ad impianti di produzione di energia elettrica, e, comunque, rientrano sempre tra le “opere rilevanti per le conseguenze di un loro collasso” qualunque sia l'utilizzazione.

E' necessario, quindi, valutare la sicurezza di un impianto di ritenuta soggetto ad azioni sismiche, nei confronti sia degli Stati Limite Ultimi (SLU) sia degli Stati Limite di Esercizio (SLE) definiti nel successivo § 1.2.1.

L'analisi di sicurezza e di funzionalità di una diga esistente si basa comunque sull'esame delle effettive condizioni dell'opera e sulla determinazione delle potenziali azioni sismiche cui l'opera può essere soggetta. Tali elementi, congiuntamente alla definizione delle prestazioni richieste, costituiscono il punto di partenza per la rivalutazione della sicurezza e della funzionalità sismiche (di seguito sinteticamente definita come “valutazione o rivalutazione sismica”).

Gli orientamenti della normativa internazionale al riguardo suggeriscono un approccio deterministico, con il quale si valuta quantitativamente, con strumenti analitici e numerici, la reale risposta delle strutture a terremoti di elevata o media intensità.

Tuttavia, occorre tenere presente che la risposta di una struttura ad azioni estreme, che impegnano i materiali ben oltre il campo lineare, è tanto più complessa da analizzare quanto più si voglia approssimare in modo accurato il reale fenomeno fisico.

Modelli particolarmente accurati nella valutazione della risposta, quali quelli relativi ad analisi dinamiche in campo non lineare, possono essere utilizzati se si è in grado di definire in modo adeguato ed attendibile tutti i parametri dei modelli stessi. E' possibile utilizzare metodi di verifica meno impegnativi, che richiedono una definizione più semplice dei parametri del modello di comportamento, adottando adeguate cautele per tener conto della incertezza del modello stesso nella valutazione della risposta.

Questo documento ha lo scopo di fornire criteri per la valutazione della sicurezza sismica e della funzionalità sismica di tutte le dighe in esercizio esistenti sul territorio nazionale, anche se ancora oggetto di collaudo ai sensi dell'art. 14 del Regolamento Dighe approvato con DPR 1363/59 ed anche se già sottoposte a verifica ai sensi del DM LL.PP. 24.3.82 in sede di progetto o successivamente.

I criteri per le verifiche sismiche qui esposti sono validi anche per le opere di nuova costruzione.

Si potranno seguire anche metodi di analisi diversi da quelli proposti nelle presenti linee guida, purché comprovati ed in grado di garantire il raggiungimento degli obiettivi di sicurezza e di funzionalità di cui al successivo § 1.2.

Nell'esposizione si forniscono indicazioni sulle metodologie di indagine, nonché di verifica, senza entrare nel dettaglio delle tecniche analitiche che possono rendersi necessarie nella valutazione della sicurezza delle dighe, sia nei confronti degli **SLU** sia nei confronti degli **SLE**.

Al fine della calibrazione di modelli di calcolo affidabili, risulta di notevole importanza l'interpretazione delle misure strumentali disponibili: la serie storica degli spostamenti, rotazioni, pressioni interstiziali, ecc. in funzione delle diverse condizioni di sollecitazioni, fasi costruttive, livelli di invaso, temperature, pregressi eventi sismici, ecc.

Per dighe murarie si intendono, ai fini delle presenti Linee guida, le dighe di calcestruzzo e le dighe di muratura di pietrame con malta.

La sicurezza e la funzionalità sismica dei serbatoi

Obiettivi di sicurezza delle dighe

Per la valutazione del comportamento dei serbatoi sotto l'azione sismica si definiscono le seguenti condizioni caratteristiche:

5. normale funzionamento;
6. danni riparabili, senza rilascio incontrollato di acqua, ferma restando la necessità di garantire il funzionamento di tutte le componenti impiantistiche ed elettro-meccaniche connesse con la sicurezza;
7. danni non riparabili, senza rilascio incontrollato di acqua, ferma restando la necessità di garantire il funzionamento degli organi necessari allo svuotamento controllato del serbatoio;
8. danni non riparabili, con rilascio incontrollato di acqua o comunque rischio di perdita di vite umane.
9. collasso della struttura.

In relazione alle sopra riportate cinque condizioni caratteristiche si definiscono quattro Stati Limite, due **SLE** (Stato Limite di immediata Operatività, **SLO**, e Stato Limite di Danno, **SLD**) e due **SLU** (Stato Limite di salvaguardia della Vita, **SLV**, e Stato Limite di prevenzione del Collasso, **SLC**).

Il passaggio dalla condizione 1. alla condizione 2. definisce lo stato limite di immediata operatività (**SLO**).

Il passaggio dalla condizione 2. alla condizione 3. definisce lo Stato Limite di Danno (**SLD**).

Il passaggio dalla condizione 3. alla condizione 4. definisce lo Stato Limite di salvaguardia della Vita umana (**SLV**).

Il passaggio dalla condizione 4. alla condizione 5. definisce lo Stato Limite di prevenzione del Collasso (**SLC**).

La valutazione della sicurezza sismica deve riguardare il serbatoio nel suo complesso; devono pertanto essere presi in considerazione tutti i componenti critici nei riguardi di ciascuno stato limite. Nel definire la criticità dei diversi componenti, particolare attenzione va posta nei confronti degli organi necessari per lo svaso. Anche un modesto danneggiamento della diga può infatti comportare la necessità di uno svaso

rapido del serbatoio, ancorché temporaneo e/o per motivi precauzionali, e a tal fine deve essere garantita l'efficienza degli scarichi profondi (fondo e mezzofondo).

Ai soli fini delle verifiche sismiche per le dighe esistenti, si può ammettere che l'opera o qualcuno dei suoi componenti critici non soddisfino i requisiti dimensionali e costruttivi minimi e le prescrizioni di verifica del D.M. LL.PP. 24.03.82 e s.m.i., purché siano effettuate con esito positivo tutte le analisi e le verifiche secondo le indicazioni riportate nelle presenti Linee guida.

Intensità delle azioni di progetto

La severità dell'azione sismica è quantificata in funzione del suo periodo di ritorno T_R , definito come il tempo medio, espresso in anni, che intercorre tra due eventi di pari e prefissata intensità. Esso corrisponde all'azione sismica che ha una prefissata probabilità di eccedenza P_{V_R} in un prefissato periodo di riferimento V_R , definito nelle Norme tecniche per le Costruzioni come il prodotto tra V_N e C_U , essendo V_N la vita nominale dell'opera e C_U il suo coefficiente d'uso. Dati V_R e la probabilità di eccedenza P_{V_R} dell'azione sismica in V_R , il periodo medio di ritorno T_R si ricava con l'espressione $T_R = -V_R / (1 - \ln P_{V_R})$

Anche se le presenti Linee guida riguardano le dighe in esercizio, per utile riferimento le considerazioni e la tabella che seguono comprendono anche le dighe di nuova costruzione.

Per le dighe attualmente in esercizio, oggetto delle presenti linee guida, la vita nominale V_N viene assunta pari a 50 anni; valori di V_N maggiori si potranno assumere motivatamente in situazioni particolari.

Per le dighe nuove di grandi dimensioni (altezza superiore a 15 m o volume di invaso superiore a 1.000.000 m³) o di importanza strategica, la vita nominale V_N è pari a 100 anni.

Le dighe, nuove o in esercizio, appartengono comunque alla classe d'uso III di cui alla Norme Tecniche per le Costruzioni e ad esse corrisponde $C_U= 1,5$. Le dighe nuove di grandi dimensioni e nuove od esistenti di importanza strategica appartengono alla classe d'uso IV e ad esse corrisponde $C_U= 2$.

Nella tabella I si riportano i valori del periodo di ritorno T_R relativi ai quattro stati limite considerati.

In base a quanto stabilito nei criteri di valutazione della Pericolosità, nella valutazione del periodo di ritorno si assume comunque come limite massimo di T_R il valore di 2475 anni e come limite minimo il valore di 30 anni.

Tab. I – Periodi di ritorno dell'azione sismica.

				Periodo di ritorno T_R (anni)			
Categoria di diga	Costruzione	C_U	V_R	SLO	SLD	SLV	SLC
Non strategiche	Nuova	1,5	150	90	150	1425	2475
	Esistente	1,5	75	45	75	711	1462
Strategiche	Nuova	2	200	120	200	1900	2475
	Esistente	2	100	60	100	949	1950

Definizione dell'azione sismica per le verifiche

L'azione sismica deve essere descritta con riferimento alla pericolosità sismica dell'area in cui ricade lo sbarramento in termini di parametri significativi del moto sismico atteso su affioramento rigido orizzontale, e di risposta del sito alle azioni suddette, e con riferimento alla tipologia costruttiva dello sbarramento stesso.

Nel caso di dighe di muratura o di calcestruzzo l'azione sismica può essere descritta in termini di spettro di risposta elastico o, per analisi dinamiche non lineari, di accelerogrammi compatibili con gli spettri di riferimento.

Nel caso di dighe di materiali sciolti l'azione sismica deve essere descritta in termini di accelerogrammi, da selezionare in base ai criteri indicati nel successivo § 2.4.2

Se l'opera di sbarramento è situata su terreni deformabili, è necessario valutare le modificazioni dell'azione sismica con uno studio di risposta sismica locale.

Interazione fluido-strutture

L'interazione dinamica tra fluido e fluido e struttura, diviene particolarmente significativa in presenza di sbarramenti deformabili. Nel caso di struttura di sbarramento sufficientemente rigido l'effetto dell'interazione con il fluido può considerarsi con riferimento alla massa aggiunta, che moltiplica l'accelerazione del terreno. Essa si manifesta come una pressione aggiuntiva funzione della accelerazione massima del terreno distribuita con forma parabolica con vertice alla sommità e massimo alla base.

DIGHE DI MATERIALI SCIOLTI

Aspetti fenomenologici

Terremoti intensi possono provocare vari tipi di danneggiamento alle dighe di materiali sciolti. I fenomeni osservati in occasione di eventi di forte intensità sono i seguenti.

- Instabilità dei paramenti, che si manifesta con scorrimenti superficiali o profondi, che possono coinvolgere anche le fondazioni. Può essere anche associata a fenomeni di liquefazione nel rilevato o nei terreni di fondazione. L'effetto principale è il crollo dell'opera o la riduzione o l'annullamento del franco con il rischio che la diga venga tracimata.
- Spostamenti differenziali (con manifestazione di fratture pericolose per la tenuta) che possono essere indotti da una riduzione di volume del rilevato o dei terreni di fondazione. Il franco può risultarne ridotto e possono innescarsi fenomeni di erosione interna. Sotto questi aspetti, sono a maggior rischio le dighe con nuclei sottili e senza adeguati filtri.
- Danneggiamenti delle opere accessorie e degli scarichi, con particolare riferimento a quelli che attraversano il corpo diga, realizzati in vigenza di precedenti normative tecniche, in particolare delle opere di scarico che attraversano il corpo diga. Durante un terremoto, la rottura delle tubazioni può determinare il rilascio di acqua all'interno del rilevato, compromettendo l'integrità della diga. La perdita di funzionalità di un'opera di scarico (inclusa quella dei suoi organi di manovra) può rendere difficile lo svuotamento del serbatoio. La strumentazione di controllo può andare fuori uso. Le vie di accesso possono essere danneggiate.
- Fratturazione dei terreni di fondazione e delle opere di impermeabilizzazione in fondazione (schermi). Si possono verificare fenomeni di aumento delle portate filtranti e dei gradienti di filtrazione, fenomeni di erosione e sifonamento.

Metodologie d'analisi

Le analisi della risposta sismica di una diga di materiali sciolti devono essere precedute dalla determinazione delle azioni sismiche di riferimento, in termini di parametri significativi del moto sismico atteso su affioramento rigido, e di risposta del sito alle azioni suddette.

Le analisi devono riguardare la stabilità dei manufatti e dei terreni, la valutazione del campo di spostamenti e, più in generale, l'interazione tra corpo diga e terreno circostante.

Le procedure di calcolo possono fare riferimento a metodi pseudostatici, ad analisi dinamiche semplificate e ad analisi dinamiche complete.

Indagini per l'accertamento dello stato di fatto

La predisposizione del piano degli accertamenti e delle indagini per identificare le condizioni attuali della diga deve tener conto dei dati acquisiti nelle fasi di progetto e di costruzione, nonché dei risultati progressivamente acquisiti tramite la strumentazione di controllo.

In base a tale preliminare quadro delle conoscenze, devono essere programmate indagini integrative, indirizzate alla caratterizzazione geotecnica dei materiali costituenti il corpo diga e i terreni di fondazione e d'imposta, con specifico riferimento alle metodologie d'analisi previste per la valutazione della vulnerabilità sismica.

Per le verifiche di stabilità dei paramenti assume interesse preminente la valutazione dei parametri di resistenza nelle condizioni di picco, post picco e residue. Le indagini debbono essere orientate a tal fine e devono anche permettere la valutazione del potenziale di liquefazione dei terreni.

Per le analisi dinamiche è necessario valutare la rigidità iniziale dei materiali e le leggi di decadimento della rigidità al crescere del livello di deformazione. Allo stesso fine, è altresì necessario valutare le caratteristiche di smorzamento dei materiali.

Indagini e prove più complesse devono essere previste per la calibrazione di modelli costitutivi avanzati, da impiegare in analisi dinamiche complete che si rendessero eventualmente necessarie.

Valutazione della vulnerabilità sismica

Stati limite

Gli **Stati Limite Ultimi (SLU)** da considerare nella valutazione della vulnerabilità sismica di una diga di materiali sciolti sono:

8. instabilità globale del corpo diga e dei terreni d'imposta;
9. liquefazione del corpo diga e dei terreni di fondazione;
10. fessure nel corpo diga e nei terreni di fondazione, tali da provocare una filtrazione incontrollata;
11. eccessive deformazioni del corpo diga e dei terreni di fondazione, tali da causare la tracimazione;
12. fratturazione dell'elemento di tenuta idraulica in fondazione;
13. tracimazione della diga per onde o crescita del livello d'invaso a causa di fenomeni d'instabilità delle sponde o delle spalle.
14. collasso o danno degli organi di scarico e in generale delle opere accessorie, che possano generare gravi conseguenze a causa dell'impossibilità di regolare la quota d'invaso.

Lo Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC) si raggiunge quando si raggiunge uno o più degli Stati Limite di cui ai punti 1 e 2 precedentemente indicati; lo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) si raggiunge quando si raggiunge uno o più degli Stati Limite di cui ai punti 3, 4, 5, 6, 7 precedentemente indicati o comunque uno Stato Limite cui si associ la perdita non controllata dell'acqua invasata

Si debbono considerare inoltre i seguenti Stati Limite di Esercizio (SLE):

1. instabilità dei paramenti;
2. danno agli organi di scarico superficiali e/o profondi tali comunque da mantenere la possibilità di controllo dell'acqua invasata.

Lo Stato Limite di Danno (SLD) si raggiunge quando si raggiunge uno o più degli Stati Limite di cui ai punti 1 e 2 precedentemente indicati; lo Stato Limite di immediata Operatività (SLO) si supera quando si supera lo Stato Limite di cui al punto 2 precedentemente indicato.

Analisi e verifiche

Per le verifiche di sicurezza e di funzionalità delle dighe di materiali sciolti sono possibili diversi strumenti d'analisi di crescente complessità e tali da richiedere specifiche indagini geotecniche, anch'esse di crescente complessità. Si individuano al riguardo i seguenti metodi di analisi e verifica:

3. I metodi pseudostatici considerano le azioni sismiche come un insieme di forze equivalenti, agenti staticamente sul corpo diga. I metodi pseudostatici possono essere impiegati per le verifiche di stabilità, valutando le potenziali superfici di scorrimento critiche con i metodi dell'equilibrio limite. Questi metodi richiedono la definizione dei coefficienti sismici orizzontale e verticale, i cui valori possono essere ricavati in ciascun punto del corpo diga con sufficiente approssimazione mediante un'analisi dinamica lineare equivalente d'interazione manufatto-terreno. Nell'analisi è necessario considerare la presenza del terreno di fondazione della diga soprattutto nei casi in cui siano prevedibili apprezzabili effetti di amplificazione locale di origine stratigrafica.
4. I metodi dinamici portano esplicitamente in conto l'azione sismica; questa, per le dighe di materiali sciolti, deve essere espressa in forma di accelerogrammi. Se si impiegano accelerogrammi registrati, la loro scelta deve essere rappresentativa della sismicità del sito (in termini di caratteristiche sismogenetiche della sorgente, magnitudo, condizioni del sito di registrazione, distanza dalla sorgente, ecc.); tali accelerogrammi devono inoltre essere selezionati e scalati per approssimare gli spettri di risposta nel campo di periodi di interesse per lo specifico problema. È ammesso l'uso di accelerogrammi generati mediante simulazione del meccanismo di sorgente purché siano giustificate le scelte sulle caratteristiche sismogenetiche della sorgente e sul mezzo di propagazione. Non è ammesso l'uso di accelerogrammi artificiali.
 - 2a. I metodi dinamici semplificati si qualificano come tali poiché assumono una forma semplificata, di tipo lineare equivalente, delle relazioni sforzi-deformazioni dei terreni. Per una valutazione sufficientemente realistica del campo di accelerazioni nel manufatto, tali metodi permettono di tener conto della presenza di fenomeni di plasticità diffusa mediante una progressiva riduzione della rigidezza al crescere del livello di deformazione. Le analisi che fanno riferimento a questi metodi non considerano l'interazione tra le fasi costituenti una terra e sono pertanto svolte in termini di tensioni totali.
 - 2b. I metodi dinamici completi permettono di svolgere analisi in termini di tensioni efficaci, considerando la presenza del fluido interstiziale, e fanno riferimento a modelli elastoplastici con incrudimento, idonei a simulare le sollecitazioni cicliche.

Nelle verifiche di stabilità dei paramenti, un'analisi dinamica semplificata può essere effettuata impiegando il metodo di Newmark che permette una valutazione di prima approssimazione dello

spostamento del volume di terreno che si è mosso lungo una prefissata superficie di scorrimento, al termine della scossa sismica.

Nel caso di terremoto severo, le verifiche di stabilità dei paramenti devono essere accompagnate da verifiche di sicurezza nei confronti della tracimazione quando dai risultati delle indagini la diga risulti realizzata con materiali che, per costituzione o modalità di posa in opera, siano suscettibili di degrado delle caratteristiche meccaniche per effetto delle azioni cicliche. A questo scopo, è necessario valutare le deformazioni permanenti del manufatto con conseguente abbassamento del coronamento.

La presenza di materiali scarsamente addensati e saturi, nel corpo diga o nel terreno di fondazione, richiede anche la valutazione del potenziale di liquefazione e le corrispondenti verifiche.

Nel caso di dighe strategiche è sempre richiesta un'analisi dinamica per verificarne la funzionalità in occasione di terremoto relativamente frequente. La scelta del tipo di analisi, semplificata o completa, dipende sia dal tipo, frequente o raro, dell'azione sismica considerata, sia dalle caratteristiche geotecniche, più o meno buone, dei materiali presenti.

DIGHE MURARIE

Aspetti fenomenologici

Le dighe murarie hanno mostrato in passato un buon comportamento all'azione sismica.

Sulle dighe di muratura e di calcestruzzo è stata riscontrata una vulnerabilità relativamente modesta, più specificamente sulle dighe ad arco non è stato riscontrato alcun danno particolarmente significativo e qualche danno modesto è stato riscontrato nelle dighe a gravità e in quelle sostenute da contrafforti; queste ultime sono risultate talvolta sensibili alle azioni perpendicolari ai contrafforti.

I principali danneggiamenti da attendersi nel corpo diga, stante il modesto valore delle tensioni di compressione tipico di queste opere, sono da ricercare nelle fessurazioni per trazione e in fenomeni di scorrimento su piani preferenziali, anche per la presenza delle pressioni dell'acqua. Va inoltre tenuto presente che l'invecchiamento può portare al degrado dei leganti, in particolare nelle dighe di muratura; peraltro possono presentarsi diminuzioni di qualità dei materiali anche nelle dighe di calcestruzzo.

Dal punto di vista dalla risposta sismica si osserva che questa, rispetto alle dighe di materiali sciolti, è più legata al comportamento lineare, stante i modesti livelli tensionali di cui si è già detto, salvo gli effetti della fessurazione per trazione che potrebbero innescare piani di scorrimento o di ribaltamento, in particolare nelle dighe a gravità. Le usuali geometrie portano in genere ad escludere meccanismi di ribaltamento. Fenomeni di crisi locale a compressione possono verificarsi in genere a seguito di aperture di lesioni dovute a fessurazioni per trazione.

Una ulteriore differenza rispetto a quanto si può osservare nelle dighe di materiali sciolti è l'effetto della interazione con il bacino d'acqua che nelle dighe murarie può risultare significativo, potendo dar luogo a variazioni della risposta significative tra i casi di serbatoio vuoto e pieno.

E' inoltre necessario valutare la stabilità globale o parziale dell'opera ed il possibile caso di cinematismi che possano coinvolgere l'ammasso roccioso di fondazione.

Metodologie d'analisi

Le analisi della risposta sismica di una diga muraria devono essere precedute dalla determinazione delle azioni sismiche di riferimento, in termini di parametri significativi del moto sismico atteso su affioramento rigido e in termini di risposta del sito alle azioni suddette.

Le analisi devono riguardare la stabilità dei manufatti e dei terreni, la valutazione del campo di spostamenti e, più in generale, l'interazione tra corpo diga e terreno circostante.

Le procedure di calcolo possono fare riferimento a metodi pseudostatici, ad analisi dinamiche semplificate e ad analisi dinamiche complete.

Indagini per l'accertamento dello stato di fatto

La predisposizione del piano degli accertamenti e delle indagini per identificare le condizioni attuali della diga deve tener conto dei dati acquisiti nelle fasi di progetto e di costruzione, nonché dei risultati progressivamente acquisiti tramite la strumentazione di controllo.

In base a tale preliminare quadro delle conoscenze, devono essere programmate indagini integrative, indirizzate alla caratterizzazione dei materiali costituenti il corpo diga e i terreni di fondazione e d'imposta, con specifico riferimento alle metodologie d'analisi previste per la valutazione della vulnerabilità sismica.

Si dovranno accertare, mediante prove in sito ed in laboratorio su campioni prelevati dal corpo diga, le caratteristiche dei materiali componenti e la loro variabilità nell'ambito del corpo diga stesso, ricostruendo la situazione di fatto. I parametri ricavati indirettamente con prove non distruttive saranno correlati a misure dirette ottenute sui campioni. Si individueranno le linee di eventuali fessure significative presenti, misurando anche, se del caso, le pressioni dell'acqua in particolare nelle zone di imposta della diga.

Si indagherà anche lo stato delle eventuali armature, dei giunti ed eventuali organi di tenuta. Nelle dighe di muratura di pietrame si valuterà lo stato di consistenza dei blocchi e delle malte.

I livelli di approfondimento delle indagini dovrà essere adeguato allo stato di conservazione della diga e tale da consentire la messa a punto di modelli di verifica sufficientemente accurati e al fine di accertare le cause di comportamenti anomali, riconducendole a improprie scelte progettuali o a difetti costruttivi, ovvero a cause sopravvenute nel corso dell'esercizio. Pertanto indagini e prove più complesse devono essere previste, se necessario, per la calibrazione di modelli costitutivi avanzati, da impiegare in analisi dinamiche complete.

Per le analisi dinamiche è necessario valutare la rigidità dei materiali ed il loro grado di fessurazione e, se possibile, la rigidità della stessa struttura e lo smorzamento anche indotto dall'interazione con la fondazione.

E' infine utile valutare sperimentalmente il livello tensionale locale.

Valutazione della vulnerabilità sismica

Stati limite

Gli **Stati Limite Ultimi (SLU)** da considerare nella valutazione della vulnerabilità sismica di una diga muraria sono:

8. instabilità globale del corpo diga e dei terreni e/o ammassi rocciosi d'imposta (per le dighe a volta);
9. instabilità del corpo diga per eccessivo scorrimento a seguito di apertura di lesioni (in strati di malta o ripresa di getto o fessure, al contatto diga roccia, nei giunti di fondazione ecc, essenzialmente nelle dighe a gravità);
10. crisi di meccanismi locali (essenzialmente dighe a volta ed a contrafforti)

11. lesioni nel corpo diga, nei terreni di fondazione o nelle superfici di contatto manufatto terreno, tali da provocare una filtrazione incontrollata;
12. rottura dell'elemento di tenuta idraulica nei giunti;
13. tracimazione della diga per onde o eccessiva crescita del livello d'invaso a causa di fenomeni d'instabilità delle sponde o delle spalle;
14. collasso o danno degli organi di scarico e in generale delle opere accessorie, che possano generare gravi conseguenze a causa dell'impossibilità di regolare la quota d'invaso.

Lo **Stato Limite** di prevenzione del **Collasso (SLC)** si raggiunge quando si raggiunge uno o più degli Stati Limite di cui ai punti 1, 2 e 3 precedentemente indicati; lo **Stato Limite** di salvaguardia della **Vita (SLV)** si raggiunge quando si raggiunge uno o più degli Stati Limite di cui ai punti 4, 5, 6, 7 precedentemente indicati o comunque uno Stato Limite cui si associ la perdita non controllata dell'acqua invasata

Si debbono considerare inoltre i seguenti **Stati Limite di Esercizio (SLE)**:

1. eccesso tensionale nel corpo diga;
2. eccesso di sollecitazione nella fondazione;
3. eccesso di deformazioni nei giunti;
4. danneggiamento degli organi di scarico superficiale o profondo;
5. danno delle opere di presa;
6. danno ai sistemi di misura e controllo.

Lo **Stato Limite** di **Danno (SLD)** si raggiunge quando si raggiunge uno o più degli Stati Limite di cui ai punti 1, 2 e 3 precedentemente indicati; lo **Stato Limite** di immediata Operatività (**SLO**) si raggiunge quando si raggiunge uno o più degli Stati Limite di cui ai punti 4, 5 e 6 precedentemente indicati.

Combinazioni di carico

I carichi elementari da considerare sono i seguenti:

- peso proprio;
- spinta idrica a monte con livello pari a quello di massimo invaso;
- spinta idrica a valle (livello idrico più gravoso);
- spinta del ghiaccio (valutata sulla base di specifiche ed attendibili misure o, in assenza, secondo i criteri di cui al D.M. 24/03/1982) e di eventuali sedimenti a monte;
- azioni di origine termica (valutate in base alle temperature misurate);
- azioni sismiche (dovute alla massa della struttura, all'acqua di invaso e agli eventuali sedimenti a monte).

I valori delle azioni da combinare con le azioni sismiche sono quelle relativi ai valori quasi statici. Gli effetti della temperatura e le azioni del ghiaccio dovranno essere considerate solo per le dighe nelle quali tali effetti si protraggono per una durata considerevole nell'arco dell'anno, e saranno anch'essi riferiti a valori che hanno una significativa probabilità di accadere in concomitanza con l'azione sismica. (a tal fine è utile riferimento l'Eurocodice EN 1990) .

In base ai carichi elementari, si definiscono le seguenti combinazioni di carico in presenza del sisma, rispettivamente per le dighe a gravità e a volta.

3.4.2.1 Combinazioni di carico per le dighe a gravità

Le combinazioni di carico da considerare sono:

- 1) **a serbatoio pieno**: peso proprio, spinta idrostatica a monte con livello al massimo invaso, pressione idrica a valle, spinta del ghiaccio (qualora sia presente per oltre il 20% dell'anno) e dei sedimenti a monte, azioni sismiche;
- 2) **a serbatoio vuoto**: come sopra ad eccezione della spinta idrostatica.

Per le dighe a gravità alleggerita (a speroni o a vani interni) deve essere valutata la concomitanza delle azioni termiche valutate con criteri adeguati a renderne elevata la possibilità che si verifichino in concomitanza con l'azione sismica.

3.4.2.2 Combinazioni di carico per le dighe a volta

Le combinazioni di carico da considerare sono:

- 1) **a serbatoio pieno**: peso proprio, pressione idrostatica a monte con livello al massimo invaso, spinta idrostatica a valle, spinta del ghiaccio (con l'osservazione di cui alle dighe a gravità) e dei sedimenti a monte, azioni di origine termica, azioni sismiche;
- 2) **a serbatoio vuoto**: come sopra ad eccezione della pressione idrica.

Criteria e Metodi di Analisi

Facendo riferimento essenzialmente al corpo diga ed alle sue fondazioni, per le verifiche di sicurezza e di funzionalità delle dighe murarie sono possibili diversi strumenti d'analisi, di crescente complessità, e tali da richiedere specifiche indagini, anch'esse di crescente complessità.

I metodi pseudostatici considerano le azioni sismiche come un insieme di forze equivalenti, agenti staticamente nel corpo diga o sul suo contorno. Essi si possono basare solo su concetti di equilibrio, ad esempio in molti casi di dighe a gravità, o anche tener conto della deformabilità della diga e della fondazione (dighe a volta e a speroni). Le azioni da applicare richiedono la definizione di coefficienti sismici orizzontali e verticali che dipendono dalla risposta dinamica della diga incluso il terreno. Essi possono essere impiegati una volta individuati possibili meccanismi di scivolamento e ribaltamento che coinvolgono o meno il terreno di fondazione.

I metodi dinamici portano esplicitamente in conto l'azione sismica; questa, nel caso di analisi lineari, può essere espressa in termini di spettro di risposta o di accelerogrammi. L'azione può derivare da specifici studi sismologici, e deve comunque tener conto delle indicazioni delle presenti Linee guida.

Nel caso di terreni di imposta sollecitati sino a livelli tali da indurne il comportamento non lineare, qualora si adottino modelli lineari equivalenti, si dovrà dare giustificazione delle scelte effettuate anche sulla base delle prove, in sito e/o di laboratorio, dirette o indirette. Per i problemi più strettamente legati a fondazioni su terreni anziché su roccia, caso piuttosto raro in questo tipo di opere, si rimanda allo specifico capitolo relativo alle dighe di materiali sciolti.

Le analisi utilizzate per la verifica sismica di dighe esistenti possono fare riferimento ad ipotesi di vario tipo nei riguardi del metodo di calcolo (statico, dinamico), delle leggi costitutive dei materiali (lineari, non lineari), della geometria (piana o tridimensionale), delle metodologie di calcolo (elementi finiti, differenze finite, elementi di frontiera, elementi distinti). Salvo particolari e motivate giustificazioni, generalmente non è ammessa la sovrapposizione degli effetti valutati con modelli di calcolo differenti.

L'effetto della interazione con l'acqua di invaso dovrà essere considerato e discusso nel modello adottato.

Verifiche agli Stati Limite Ultimi

Si possono adottare criteri di verifica con diversi livelli di accuratezza, da verifiche semplificate sino a molto complesse, descrivendo in modo sempre più accurato la realtà fisica del fenomeno. Il percorso è funzione del soddisfacimento dei criteri di accettazione, che dipendono dal livello di verifica. Nella presentazione dei risultati delle rivalutazioni sismiche è opportuno che vengano documentati tutti i livelli dell'analisi che è stato necessario esplorare fino a giungere al giudizio conclusivo. Quando si effettua una valutazione quantitativa della sicurezza sismica è richiesta, oltre che la valutazione dell'opera nei confronti delle azioni sismiche attese, anche la stima dell'azione sismica massima che la diga può sopportare.

Quando si ipotizza un comportamento lineare dei materiali in campo statico o dinamico, la massima tensione di compressione deve risultare inferiore alla resistenza caratteristica che può essere stimata per l'opera, opportunamente ridotta per tener conto delle incertezze presenti nella conoscenza del materiale in opera. Una stima di riferimento è la resistenza cilindrica divisa per un coefficiente parziale pari ad 1.6 senza tener conto di ulteriori riduzioni per i carichi di lunga durata.

Si dovrà assumere resistenza a trazione nulla nei giunti e nelle discontinuità (riprese di getto, lesioni e fessure, muratura di pietrame e malta, giunti in roccia). Qualora sia possibile escludere la fessurazione prima dell'evento di verifica, si potrà tener conto di una resistenza a trazione con la quale verificare l'innescio dei meccanismi di collasso. Essa potrà basarsi su una opportuna stima della resistenza a trazione misurata sperimentalmente, adeguatamente ridotta. Rappresenta un utile riferimento la resistenza a trazione per flessione per stimare la resistenza caratteristica, ridotta di un coefficiente parziale non inferiore a 1.6. Si dovrà considerare nell'equilibrio l'effetto della pressione dell'acqua nel corpo diga ed in particolare nelle lesioni.

I parametri di resistenza al taglio dell'ammasso roccioso di fondazione, dei giunti e delle superfici di discontinuità, devono essere congruenti con le caratteristiche dei materiali, e caratterizzati sulla base dei sistemi di classificazione correntemente adottati.

E' necessario anche verificare, per le dighe a gravità, che gli spostamenti relativi tra i vari elementi siano compatibili con le ampiezze medie dei giunti, mentre, per le dighe a volta, è necessario verificare che gli sforzi siano compatibili con la resistenza disponibile, in modo da mantenere un comportamento monolitico della diga.

Dighe che presentano fenomeni fessurativi possono essere ancora trattate con analisi di tipo lineare, a condizione di controllare che gli sforzi in corrispondenza delle superfici delle fessure siano compatibili con la resistenza disponibile.

Quando si effettua un'analisi statica in campo non lineare il comportamento dei materiali e delle interfacce (sia quelle previste in progetto che quelle provocate da fenomeni fessurativi importanti) deve essere modellato motivando adeguatamente i parametri di resistenza adottati, anche alla luce di specifiche indagini.

Il criterio di accettazione si basa sul controllo di deformazioni e di spostamenti. In sostanza, data la non linearità di comportamento del materiale, sono accettate plasticizzazioni locali e ridistribuzioni all'interno della struttura, purché non si raggiunga una condizione di collasso globale dell'opera. Gli spostamenti previsti dal modello devono essere confrontati con quelli compatibili con il mantenimento del requisito di contenimento dell'acqua.

Quando si effettua un'analisi dinamica in campo non lineare il comportamento dei materiali e delle interfacce (sia quelle previste in progetto che quelle provocate da fenomeni fessurativi importanti) deve essere modellato motivando adeguatamente i parametri di resistenza adottati, anche alla luce di specifiche indagini.

Il criterio di accettazione si basa sugli stessi controlli deformativi e di spostamenti descritti in precedenza per le analisi statiche non lineari.

Stabilità allo scorrimento delle dighe a gravità e delle traverse

In aggiunta alle verifiche tensionali e deformative, per le dighe a gravità e le traverse deve anche essere valutata la sicurezza allo scorrimento.

Per le dighe a gravità e le traverse, la sicurezza allo scorrimento può essere valutata con una analisi pseudostatica confrontando le forze resistenti e le forze agenti sulla superficie di verifica assunta, al contatto del corpo diga con le fondazioni e lungo eventuali giunti e fratture presenti nel corpo della diga e nella roccia.

Le forze sismiche di taglio parallele alla superficie di verifica devono essere valutate riducendo opportunamente i valori che si otterrebbero con una analisi dinamica elastica lineare.

Particolare attenzione deve essere posta nella stima della risposta, appare inoltre sempre opportuno eseguire analisi parametriche, facendo variare i parametri meccanici utilizzati sia di resistenza che di rigidità.

Verifiche allo scorrimento devono anche essere condotte in fondazione e sulle spalle in presenza di cinematismi di scorrimento potenzialmente sfavorevoli alla stabilità dell'opera. A tal fine è necessario individuare le principali famiglie di discontinuità in fondazione, caratterizzare l'ammasso roccioso ed i relativi giunti, identificare i possibili cinematismi di instabilità.

Nei casi di maggior complessità, può essere utile ricorrere a modelli numerici. Si può valutare lo scorrimento, in campo dinamico non lineare. Anche in questo caso una analisi parametrica dell'influenza delle diverse scelte costituisce utile strumento di giudizio.

La verifica ha esito positivo se, anche in presenza di scorrimenti permanenti, è garantita l'azione di contenimento dell'acqua. E' opportuno che venga discussa l'influenza dell'entità dello scorrimento in relazione alla situazione della diga.

Verifiche agli Stati Limite di Esercizio

Le verifiche funzionalità agli Stati Limite di Esercizio hanno lo scopo di determinare gli effetti tensionali e deformativi causati dall'azione sismica, di correlarli al danno e di valutare che se tale stato di danno sia compatibile con il requisito di operatività dell'opera e se il danno stesso sia o no riparabile.

SCARICHI E OPERE COMPLEMENTARI E ACCESSORIE

Premessa

Gli scarichi e le opere complementari e accessorie della diga (scarichi di superficie, scarichi profondi, loro organi di intercettazione e movimentazione e strumentazione di controllo) devono essere considerati tra i componenti nella rivalutazione sismica delle dighe, al fine di individuare, secondo quanto illustrato al punto 1.2.2 delle presenti Linee guida, se essi sono componenti critici. In particolare è da valutare se il mancato funzionamento, il danneggiamento o la rottura di essi può portare alla perdita di controllo dell'invaso o di funzionalità del serbatoio.

In particolare deve essere garantita, come minimo, l'operatività degli scarichi profondi e di superficie.

Aspetti fenomenologici

Le tipologie dei danni agli scarichi sono variabili da opera ad opera

- Gli scarichi di superficie, a volte di geometria complessa (ad esempio calici, sifoni, ecc.), possono subire danneggiamenti a seguito delle deformazioni imposte dal terreno.
- Le paratoie, a seguito di deformazioni eccessive, superiori alle tolleranze meccaniche disponibili nelle parti mobili, possono causare il blocco degli organi di scarico. Il funzionamento regolare delle paratoie dipende dall'efficienza di molti componenti quali: strade, gallerie e ponti di accesso, impianto oleo-dinamico, fonti di energia e cavidotti, edifici che ospitano gli impianti, ecc., nonché dai singoli componenti delle paratoie stesse quali gargamature, ancoraggi, contrappesi, ecc., il cui malfunzionamento può provocare l'inefficienza dello scarico.
- Per lo scarico di superficie occorre considerare che, in aggiunta al carico idraulico, le forze inerziali indotte dal sisma possono provocare l'instabilità meccanica del sistema di paratoie, ciò in particolare per impianti a funzionamento automatico. Se lo scarico si trova sul coronamento occorre considerare gli effetti di amplificazione del moto provocato dalla risposta dinamica della diga.
- Le gallerie degli scarichi possono avere una funzione importante per la sicurezza della diga perché in alcuni casi devono consentire lo svuotamento del serbatoio per motivi precauzionali o per consentire ispezioni. In aggiunta, le opere di derivazione e di presa possono avere una funzione strategica per l'approvvigionamento idrico a fini potabili o antincendio. Essendo opere di elevato sviluppo longitudinale, una particolare attenzione va riservata ai movimenti differenziali sia in senso trasversale che longitudinale.
- La rottura di condutture e il conseguente rilascio di acqua può investire strutture essenziali per la sicurezza della diga (critiche), devono essere previsti accorgimenti per allontanare le acque dalle strutture potenzialmente investite dalle acque.
- Deve essere attentamente valutata la criticità di gallerie, in pressione o non, e di quelle destinate all'accesso. Le gallerie non sono in genere strutture vulnerabili al sisma, ma occorre prestare particolare attenzione alle opere di imbocco, soggette ad ostruzioni di vario tipo, quali ad esempio la caduta di massi, l'ostruzione per frane, il collasso strutturale dovuto a sovrappressioni.
- Se la galleria attraversa una zona soggetta a movimenti differenziali (faglie, frane, paleofrane, presenza di terreni deformabili, passaggio tra terreni a rigidità diversa, innesti in opere rigide ecc.) è necessario considerare l'opportunità di assumere provvedimenti locali in grado di assicurare la funzionalità dell'opera (ad es. adottando un rivestimento metallico o altro).
- Se, in vecchie opere, una condotta attraversa il rilevato di una diga in materiali sciolti, possono nascere sollecitazioni e deformazioni eccessive a seguito della interazione terreno-struttura.
- La crisi dei sistemi meccanici, elettrici e strumentali può dar luogo alla perdita di funzionalità dei sistemi di intercettazione e controllo.

Metodi di Analisi e Verifica

Per le opere che possono rientrare tra quelle disciplinate dalle vigenti norme sismiche per le costruzioni, si possono adottare i criteri di verifica ivi considerati. Le azioni sismiche sono quelle definite nelle presenti Linee guida.

Per le opere che, per la loro specificità, non ricadono tra quelle già disciplinate dalle vigenti norme sismiche, i metodi di verifica sono definiti nelle presenti Linee guida.

Nella valutazione dell'azione sismica di verifica si dovrà tenere conto della posizione dell'opera accessoria nell'ambito dell'invaso e del corpo diga. In particolare, si dovrà adeguatamente tener conto del fatto che l'opera si trovi sul corpo diga.

Quando lo scarico si trova sul corpo diga, qualora l'opera non modifichi, per caratteristiche di massa, rigidità e resistenza, la risposta del corpo diga stesso, si potrà considerare come moto sismico che agisce sullo scarico la risposta della diga in assenza di esso, e verificare lo scarico soggetto a tale moto.

Per strutture non direttamente fondate su terreno rigido, occorre considerare, nella valutazione del carico sismico, i possibili effetti di amplificazione dovute a condizioni di sito diverse o alla struttura sottostante.

Il progettista valuterà quale metodo di verifica adottare in relazione alle caratteristiche della struttura, dandone adeguata giustificazione.

La qualificazione per i dispositivi meccanici considerati critici deve essere effettuata, preferibilmente, sulla base di analisi e/o prove specifiche condotte su tavola vibrante.

Si descrivono, nel seguito, i metodi utilizzabili per la verifica della risposta sismica. Metodi alternativi possono essere utilizzati purché adeguatamente giustificati.

Indagini per accertare lo stato di fatto

La predisposizione del piano degli accertamenti e delle indagini per identificare le condizioni attuali degli scarichi deve tener conto dei dati acquisiti nelle fasi di progetto e di costruzione, a partire dai documenti progettuali, nonché dei risultati progressivamente acquisiti tramite la strumentazione di controllo.

In base a tale preliminare quadro delle conoscenze, devono essere programmate indagini, indirizzate alla caratterizzazione dei materiali costituenti gli elementi strutturali nonché i terreni di fondazione e d'imposta, con specifico riferimento alle metodologie d'analisi previste per la valutazione della vulnerabilità sismica.

Qualora sia necessario eseguire analisi della interazione terreno struttura, si rimanda a quanto indicato per le dighe di materiali sciolti.

Per quanto si riferisce alla valutazione delle caratteristiche dei materiali da costruzione utilizzati, si utilizzeranno criteri di indagine distruttive e non distruttive. Qualora si utilizzino analisi non lineari sia statiche che dinamiche, le caratteristiche di deformabilità, resistenza e smorzamento saranno derivate con indagini sia dirette che indirette. In particolare, sarà necessario giustificare i dati ricavati con prove non distruttive (in genere indirette) con un adeguato numero di prove distruttive su campioni opportunamente prelevati. Sarà discusso il criterio di passaggio dalle caratteristiche derivate nelle prove a quelle utilizzate per la verifica.

Valutazione della Vulnerabilità sismica

Stati Limite

Gli stati limite da considerare dipendono dalla singola opera costituente lo scarico e precisamente:

Scarichi

In genere è possibile ipotizzare che gli Stati Limite di Esercizio (SLE) non siano mai raggiunti se non sono raggiunti gli Stati Limite Ultimi (SLU). Pertanto è in genere da verificare che non siano raggiunti lo Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC) e lo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV).

Qualora siano presenti elementi non strutturali necessari per il funzionamento dello scarico di superficie occorre individuarne le possibili cause di messa fuori servizio ed i criteri di verifica in relazione alle sollecitazioni localmente indotte dall'azione sismica, sia in termini di accelerazioni che di deformazioni. Le verifiche consistiranno quindi nel controllare che non si raggiungano i livelli di sollecitazioni che mettono fuori servizio tali elementi.

Paratoie

Anche in questo caso, e per i motivi già enunciati per gli scarichi, è in genere da verificare che non vengano raggiunti i soli **Stati Limite Ultimi**, con riferimento agli Stati Limite Ultimi seguenti:

1. Eccesso di deformazione con conseguente blocco meccanico degli organi in movimento;
2. Messa fuori uso dei singoli componenti meccanici;
3. Instabilità meccanica delle paratoie.

Condutture e gallerie

Anche in questo caso, e per i motivi già enunciati per gli scarichi, è in genere da verificare che non vengano raggiunti i soli **Stati Limite Ultimi**, con riferimento agli Stati Limite Ultimi seguenti:

1. Apertura di giunti tra i conci;
2. Rottura per effetto delle deformazioni indotte dal terreno;
3. Rilascio d'acqua a seguito del danneggiamento della condotta, in particolare nelle condotte in pressione.

Impianti

Nel caso degli impianti occorre verificare il rispetto sia degli Stati Limite di Esercizio, verificando che non si manifestino messe fuori servizio a seguito di accelerazioni eccessive o a seguito di deformazioni imposte eccessive, sia degli Stati Limite Ultimi, verificando che non avvengano rotture interne o degli ancoraggi.

Analisi e verifiche

I metodi di analisi e verifica dipendono dalla tipologia dell'opera accessoria. In generale è possibile fare riferimento a quanto già indicato nei punti relativi alle dighe in materiali sciolti per quanto si riferisce ai problemi connessi alle opere di terra, ed alla interazione terreno struttura, a quanto detto nei punti relativi alle dighe di calcestruzzo e muratura ed a quanto previsto nelle normative per le costruzioni edilizie per le opere in calcestruzzo, cemento armato ed acciaio, ed di muratura.

Per le gallerie è in generale necessario considerare l'interazione con il terreno circostante, quando realizzate in terreni deformabili. A tal fine è usualmente sufficiente eseguire analisi approssimate ove viene impostata la galleria ed ad una adeguata porzione di terreno con la quale interagisce, le deformazioni del terreno nel quali si propaga il moto sismico, valutando separatamente le onde che producono movimenti ortogonali o paralleli all'asse della galleria.

Per le opere immerse in acqua è in genere indispensabile tenere conto del contributo inerziale dell'acqua almeno quale massa aggiunta alla massa della struttura.

La qualificazione sismica dei sistemi meccanici, elettrici e strumentali è essenziale per la funzionalità dei sistemi di intercettazione e controllo. La qualificazione per i dispositivi considerati critici deve essere effettuata sulla base di analisi e/o prove specifiche condotte su tavola vibrante.

STABILITA' DELLE SPONDE

Considerazioni generali

Fenomeni di instabilità delle sponde lungo i versanti che delimitano l'invaso possono essere causa di gravi malfunzionamenti dell'opera di sbarramento e degli organi di scarico nonché, in rapporto ai volumi mobilitati e alle velocità delle masse di terreno in movimento, di innalzamento del livello di invaso e di formazione di onde, con rischio di tracimazione della diga.

Il comportamento delle sponde sotto l'azione sismica deve pertanto essere attentamente valutato individuando preliminarmente, anche con studi geomorfologici, le aree instabili o potenzialmente instabili e sottoponendo poi ad accertamenti ed analisi geotecniche le situazioni più critiche, con priorità alle aree di accertata instabilità.

Le verifiche di stabilità devono riguardare sia le condizioni statiche delle sponde, prima del sisma, sia le condizioni durante e dopo il sisma, quando possono ancora manifestarsi progressive variazioni del regime delle pressioni interstiziali e alterazioni dei parametri di resistenza.

Indagini ed accertamenti

Quale che sia il livello di approfondimento richiesto e il metodo di analisi conseguentemente adottato, ai fini della predisposizione del modello geotecnico è necessario accertare:

- le caratteristiche morfologiche e stratigrafiche del pendio e la presenza di eventuali discontinuità;
- le caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni, in condizioni statiche e dinamiche, con particolare riguardo alle caratteristiche di resistenza di picco, post picco e residue;
- il regime delle pressioni interstiziali;
- i caratteri cinematici del movimento, in caso di pendii in frana.

Metodologie d'analisi

Le condizioni di stabilità delle sponde possono essere valutate quantitativamente impiegando metodi pseudostatici e metodi di analisi dinamica (semplificata o avanzata).

Con i metodi pseudostatici il margine di sicurezza è valutato rispetto a una condizione di equilibrio limite, cioè a uno stato limite ultimo.

Con i metodi di analisi dinamica è possibile stimare le deformazioni indotte nel terreno dall'azione sismica e, quindi, gli spostamenti permanenti del pendio al termine della scossa. Tali metodi permettono un confronto tra valori ammissibili degli spostamenti e valori attesi per un dato evento sismico. Conseguentemente, possono essere effettuate verifiche riferite sia ad uno stato limite ultimo sia ad uno stato limite di danno.

Metodi pseudostatici

Nei metodi pseudostatici si fa comunemente riferimento ad un modello di tipo rigido-plastico per il terreno, con analisi svolte sia in termini di tensioni efficaci sia di tensioni totali. Ai fini di una corretta valutazione delle condizioni di stabilità, è necessario che i parametri di resistenza dei terreni siano determinati sperimentalmente sia nelle condizioni di picco, sia nelle condizioni di post picco e residue.

L'azione sismica è rappresentata da una forza d'inerzia statica equivalente, proporzionale al peso W della massa potenzialmente instabile, le cui componenti orizzontale e verticale sono fornite dalle espressioni $F_h = k_h W$ e $F_v = k_v W$ e dove i valori dei coefficienti sismici k_h e k_v sono fissati dalla normativa con riferimento allo SLC.

L'approccio pseudostatico può essere seguito adottando i metodi globali dell'equilibrio limite o i metodi delle strisce, il cui impiego richiede in genere il ricorso a codici di calcolo automatico.

I metodi pseudostatici non dovrebbero essere impiegati in presenza di terreni capaci di generare elevate sovrappressioni interstiziali o significativi fenomeni di degradazione sotto carichi ciclici.

Metodi dinamici

Tra i metodi dinamici è frequentemente seguito il metodo degli spostamenti. Si tratta di un approccio semplificato che si basa sul modello del blocco rigido di Newmark.

In tale approccio l'azione sismica è rappresentata da uno o più accelerogrammi, da scegliere seguendo le indicazioni riportate nel § 2.4.2, tenendo anche conto degli effetti stratigrafici e topografici locali.

Il metodo degli spostamenti prevede che la massa di terreno potenzialmente instabile si muova come un corpo rigido su una assegnata superficie di scorrimento tutte le volte che l'accelerazione superi un valore di soglia corrispondente alle condizioni di collasso incipiente ($F = 1$) e che il movimento si arresti quando l'accelerazione, cambiando di segno, induca una velocità relativa nulla tra il corpo di frana e il terreno sottostante. E' evidente come lo spostamento complessivo del corpo di frana dipende dal numero di volte in cui l'accelerazione superi il valore critico di soglia e dalla durata degli intervalli di tempo in cui tale condizione si manifesti.

Il confronto tra il valore dello spostamento complessivo e il valore dello spostamento ammissibile permette di valutare un indice di prestazione sismica del pendio.

Tutto ciò premesso e considerato, nelle considerazioni che precedono

E' IL PARERE

espresso all'unanimità dalle Sezioni.

LA COMMISSIONE RELATRICE