

GARA EUROPEA A PROCEDURA APERTA PER L'AFFIDAMENTO DEI SERVIZI DI ARCHITETTURA ED INGEGNERIA RELATIVI ALLO STUDIO DI RIVALUTAZIONE SISMICA PER L'INDIVIDUAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MANUTENZIONE STRAORDINARIA E MESSA IN SICUREZZA DELLA DIGA SANTA ROSALIA GESTITA DALLA REGIONE SICILIANA

## **DIGA SANTA ROSALIA**

### **3) CAPITOLATO TECNICO PRESTAZIONALE**

relativo ai servizi di architettura ed ingegneria oggetto dell'appalto

#### **CAPO I Rivalutazione della sicurezza sismica**

## **0 - Oggetto dell'appalto**

L'appalto prevede l'esecuzione dei servizi di architettura e ingegneria relativi agli studi di rivalutazione della sicurezza sismica del corpo diga e delle opere accessorie e, a esito di questi, alla redazione degli eventuali progetti finalizzati alla messa in sicurezza, dal punto di vista strutturale, della diga Santa Rosalia.

Il luogo di svolgimento dei servizi in appalto è sito nel territorio comunale di Ragusa.

Al presente capitolato prestazionale è allegata la specifica scheda tecnico-descrittiva nella quale sono riportati, oltre i peculiari dati tecnici e le informazioni attinenti la diga in oggetto, anche:

- i requisiti e gli obiettivi da perseguire per la verifica e la eventuale progettazione per la messa in sicurezza, dal punto di vista strutturale, dell'infrastruttura;
- l'elencazione della documentazione utile all'espletamento dei servizi in appalto che, all'atto della sottoscrizione del disciplinare, la Stazione appaltante provvederà a fornire e/o a rendere disponibile al soggetto incaricato per l'eventuale consultazione in formato cartaceo e, dove possibile, anche in versione digitale; qualora la documentazione fornita dalla Stazione appaltante si rilevasse non del tutto sufficiente per lo svolgimento dell'incarico, le ulteriori prestazioni per la ricerca e l'ottenimento di complementare e/o integrativa documentazione verranno eseguite dall'Aggiudicatario senza ulteriori oneri a carico dell'Amministrazione.

## **CAPO I**

### **RIVALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA**

## **1 - Oggetto dell'appalto**

L'appalto prevede l'esecuzione dei servizi tecnici/attività e di tutte le verifiche propedeutiche ed esaustive al fine della produzione dello studio per la rivalutazione della sicurezza sismica dello sbarramento, delle sponde di invaso e delle opere accessorie della diga.

Le attività e le operazioni concernenti le verifiche in questione sono così articolate:

- ricognizione e verifica della documentazione esistente;
- rilievi integrativi e ricostruzione di eventuali disegni di consistenza oltre quelli già disponibili, ove ritenuto necessario;
- definizione del piano di indagini;
- esecuzione delle indagini e prove di laboratorio;
- direzione lavori, supervisione e controllo in fase di esecuzione delle indagini;
- redazione dello studio geologico;
- redazione dello studio geotecnico con particolare riferimento al corpo diga, anche alla luce dei risultati delle indagini e delle misure già effettuate;
- eventuale studio sismotettonico (ove ritenuto necessario);
- esecuzione delle verifiche sismiche;
- giudizio complessivo sulla sicurezza sismica;
- definizione degli interventi di miglioramento/adequamento delle condizioni di stabilità del corpo diga;
- esame delle possibilità di miglioramento/adequamento sismico delle opere accessorie, nel caso in cui le verifiche sismiche abbiano avuto esito negativo.

Sono altresì incluse nell'appalto tutte le altre prestazioni che, sebbene sopra non menzionate, si dovessero rendere propedeutiche e/o necessarie nel corso dello svolgimento dell'appalto, ai fini dell'esecuzione delle verifiche sismiche.

## **2 - Descrizione delle opere oggetto di studio**

Per la peculiare descrizione della diga, sponde dell'invaso e opere accessorie da sottoporre a verifica sismica si rimanda alla relativa scheda tecnica allegata al presente capitolato.

### 3 - Regole e norme tecniche da rispettare

La studio dovrà essere redatto nel rispetto delle norme che si richiamano, per costituirne parte integrante essenziale.

- Decreto Legge 29 marzo 2004 n. 79, così come convertito in Legge 1 agosto 2004, n° 139 - *“Disposizioni urgenti in materia di sicurezza di grandi dighe.”*
- D.M. 14 gennaio 2008 – *“NTC 2008 – Norme tecniche per le costruzioni”*, così come modificato ed aggiornato dal D.M. 17 gennaio 2018 – *“Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”*;
- Decreto Legge 6 dicembre 2011, n° 201, convertito in Legge 22 dicembre 2011, n° 214 *“Disposizioni urgenti per la crescita, l’equità ed il consolidamento dei conti pubblici”*, con particolare riferimento per le Dighe all’art. 43 *“Alleggerimento e semplificazione delle procedure, riduzione dei costi ed altre misure”*.
- Decreto Ministero Infrastrutture e Trasporti 26 giugno 2014 – *“Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse) (NTD).*

### 4 - Aspetti normativi specifici per le dighe

Le verifiche di sicurezza sismica verranno eseguite con riferimento alla normativa per tutte le costruzioni in genere [NTC 2018], ma anche alle norme che riguardano in modo specifico gli sbarramenti di ritenuta [NTD 2014].

Vengono nel seguito precisati i seguenti aspetti particolari che verranno approfonditi nei paragrafi successivi.

a - **Tipo di diga:** *“B - Dighe rilevanti per le conseguenze di un eventuale collasso”* ( vedi [NTD 2014] § C.7.7.2).

b - **Vita nominale:** vedi [NTD 2014] § H.3.4.1.

c - **Situazioni di verifiche in presenza di sisma:** (1) a serbatoio pieno (con livello alla quota massima di regolazione e (2) a serbatoio vuoto ( vedi [NTD 2014] § C.8 e C.7.7.3).

d - **Forze da considerare:** peso proprio, spinta idrostatica, sottospinta, spinta dovuta all’interrimento, azione sismica con relativo incremento inerziale dell’acqua ( vedi [NTD 2014] § C.7).

e - **Composizione azioni sismiche:** va adottata la specifica prescrizione della normativa [NTD 2014] - § C.8 punto (d).

f - **Localizzazione delle verifiche allo scorrimento:** piani a varie quote nel corpo diga, piano di fondazione, eventuali piani di stratificazione o di faglia in fondazione ( vedi [NTD 2014] § D.2.2.1).

g - **Criterio di rivalutazione sismica per Opere Accessorie e Complementari:** va individuato quali di queste opere sono ‘componenti critici’ dello sbarramento e ‘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’ ( vedi [NTD 2014] § H.4.1).

h - **Normativa attuale:** per opere esistenti, progettate in accordo con norme tecniche previgenti, *“dovranno essere accertate ed esaminate le difformità costruttive rispetto alle presenti norme per le dighe di nuova costruzione”* ( vedi [NTD 2014] § H.3.3).

i - **Miglioramento sismico:** l’obbligo di procedere a interventi migliorativi si pone quando le analisi per valutare la sicurezza sismica *“lascino prevedere il raggiungimento di uno SLU (SLV/SLC)”* - ( vedi [NTD 2014] § H.2.2).

### 5 - Requisiti tecnici e contenuti dello studio

L’obiettivo generale dell’azione di riqualificazione sismica deve comprendere i seguenti aspetti:

- a- Verifica della stabilità dello sbarramento, inteso come complesso della diga e delle annesse opere di scarico, e della compatibilità delle deformazioni indotte dall’evento sismico, sia nei riguardi del buon contenimento dell’invaso (cedimenti del coronamento), sia nei riguardi di porzioni della struttura fra loro adiacenti, ma differenziate per caratteristiche geometriche (cedimenti differenziali fra zone ad altezza diversa), o per rigidità dei materiali interessati (cedimenti differenziali fra zone di materiali diversi o al contatto fra le opere murarie).
- b- Verifica di stabilità delle opere di scarico.

c- Verifica di stabilità delle opere accessorie.

d- verifica della stabilità delle sponde del serbatoio, ove sussistano situazioni di potenziali dissesti, sia per l'acclività delle sponde, sia per alterazione o dissesto dei terreni interessati.

e- Analisi delle possibilità di eventuale "adeguamento sismico", nel caso in cui le verifiche sismiche della stabilità abbiano avuto esito negativo.

Inoltre, per rispondere compiutamente alle prescrizioni della normativa vigente lo studio dovrà essere articolato come segue.

1. Parte generale: questa parte è intesa a fornire tutti gli elementi per identificare e caratterizzare l'impianto interessato e per indicare l'oggetto e le finalità dello Studio. In particolare gli argomenti da trattare saranno i seguenti.

- dati d'identificazione dell'impianto, con le principali caratteristiche;
- oggetto e finalità dello studio, con riferimento alla normativa vigente, ai previsti intenti della stessa e alle oggettive condizioni delle opere costituenti l'impianto;
- riferimenti alla normativa vigente;
- caratteristiche dello sbarramento, come complesso di diga e opere di scarico, del serbatoio e relative sponde, e delle opere accessorie significative per il buon funzionamento di tutto l'impianto;
- esame dello stato di conservazione delle opere da verificare.

2. Parte conoscitiva: questa parte è finalizzata alla descrizione e commento delle caratteristiche essenziali di tutte le opere interessate dalle verifiche sismiche, come risultanti sia dalla Documentazione in possesso del Gestore, sia dai risultati delle indagini programmate. Dovranno essere trattati esaurientemente i seguenti aspetti:

- caratterizzazione di tutte le opere d'interesse, sia per quanto riguarda le proprietà geometriche e strutturali, sia gli aspetti geologici e geotecnici delle relative fondazioni;
- stato di conservazione delle opere stesse.

3. Quadro geologico: sulla base dell'analisi della documentazione esistente dovrà valutarsi la necessità di redigere un nuovo Studio Geologico o integrare l'esistente, al fine di definire il modello geologico di riferimento. Esso dovrà comunque interessare tutti i terreni dell'imposta diga, sia sul fondo valle che sulle sponde, e comprendere la ricostruzione della situazione litologica, stratigrafica, strutturale e sismotettonica di tutta la zona di imposta.

4. Caratterizzazione strutturale e geotecnica delle opere: sulla base dei dati acquisiti dalla documentazione esistente e dei risultati ottenuti con le nuove indagini programmate, anche per queste opere verranno definiti tutti i dati necessari per la corretta modellazione di calcolo, per le specifiche verifiche che saranno previste secondo la importanza della singola opera nel complesso generale dello sbarramento.

5. Caratterizzazione morfologica e geotecnica delle sponde del serbatoio: le sponde del serbatoio dovranno essere esaminate attentamente, al fine di accertare l'eventuale presenza di zone di dissesto in atto o potenziale. In base alle risultanze di tale esame dovrà essere fornita una dettagliata descrizione delle sponde stesse e del loro stato di sicurezza. Nel caso risultino individuate zone di dissesto, verranno caratterizzate sia per l'aspetto morfologico che per quello geotecnico, in base alle risultanze delle indagini allo scopo previste.

6. Definizione dell'azione sismica, in relazione ai siti interessati e alle caratteristiche delle opere in esame, in termini di parametri di pericolosità sismica di base e conseguentemente in termini di coefficienti sismici, di spettri di risposta e di accelerogrammi.

7. Esecuzione delle verifiche di stabilità, in tutte le condizioni degli Stati Limite significativi per il tipo di opera considerata.

8. Parere motivato sull'accettabilità dei risultati ottenuti.

9. Esame delle possibilità di adeguamento sismico, per le principali opere che abbiano denunciato un grado di stabilità non soddisfacente o cedimenti non compatibili con il buon comportamento dell'opera.

Rimandando agli articoli successive per maggiori specifiche, si riportano nel seguito alcune disposizioni comuni:

- preliminarmente alla valutazione di sicurezza è necessario esaminare il comportamento dello sbarramento durante l'esercizio, per evidenziare eventuali insufficienze originarie legate a carenze progettuali o realizzative, o criticità successivamente intervenute;
- in particolare, anche attraverso l'esame della documentazione disponibile, occorre:
  - controllare il comportamento dell'opera mediante l'esame della serie storica dei dati di monitoraggio;
  - considerare i vari aspetti riguardanti la sicurezza (interrimento, opere di scarico, casa di guardia, potenziali situazioni critiche delle sponde, altre opere rilevanti);
  - porre particolare attenzione all'esame della risposta della diga agli eventi sismici avvenuti durante l'esercizio;
- l'esame del comportamento rilevato con il monitoraggio è necessario anche per la calibrazione dei modelli di calcolo. Nel caso in cui i dati strumentali siano di scarsa qualità o poco rappresentativi, e conseguentemente non fosse possibile effettuare una calibrazione attendibile del modello di calcolo, sarà necessario adottare ulteriori margini di sicurezza nelle verifiche. Si potranno, ad esempio, utilizzare fattori di confidenza più gravosi per le resistenze dei materiali;
- le verifiche devono essere effettuate mediante analisi progressive, a complessità crescente, che illustrino dettagliatamente anche i risultati di modelli più semplici e che esaminino, da un punto di vista ingegneristico oltre che numerico, l'attendibilità e le conseguenze della complessità via via introdotte nel calcolo;
- il giudizio conclusivo sullo studio eseguito deve essere formulato tenendo conto di tutte le analisi effettuate, anche attraverso il confronto con i risultati di analisi semplificate;
- se le verifiche non consentono di esprimere un giudizio positivo per la sicurezza, nelle more degli approfondimenti richiesti e della definizione dei conseguenti interventi, dovrà essere valutata l'opportunità di definire un livello di invaso ritenuto di assoluta sicurezza per evitare rilasci incontrollati, anche a seguito di meccanismi di collasso che potrebbero instaurarsi anche in caso di sisma;
- i dati di ingresso, le ipotesi formulate ed i risultati devono essere esposti in maniera esauriente, chiara, leggibile e comprensibile, sia nel testo, sia nelle tabelle e negli elaborati grafici. Nella relazione illustrativa deve essere esposto un giudizio ingegneristico motivato di accettabilità dei risultati.

## 6 - Indagini conoscitive

Per il caso in esame, il corpo diga, le opere accessorie e quelle di scarico sono da inquadrarsi come costruzioni esistenti ai sensi del Cap. 8 del DM 17/01/2018. Per la valutazione della sicurezza sismica delle stesse è necessario conseguire un livello di conoscenza adeguato sia rispetto alla geometria e ai dettagli costruttivi, sia rispetto alle caratteristiche meccaniche dei materiali.

Per quanto definito al §8.2 del DM 2018, la valutazione della sicurezza delle opere esistenti deve tenere conto dei seguenti aspetti:

- la costruzione riflette lo stato delle conoscenze al tempo della sua realizzazione;
- possono essere insiti e non palesi difetti di impostazione e di realizzazione;
- la costruzione può essere stata soggetta ad azioni, anche eccezionali, i cui effetti non siano completamente manifesti;
- le strutture possono presentare degrado e/o modificazioni significative rispetto alla situazione originaria.

Nella definizione dei modelli strutturali, si dovrà, inoltre, tenere conto che:

- la geometria e i dettagli costruttivi sono definiti e la loro conoscenza dipende solo dalla documentazione disponibile e dal livello di approfondimento delle indagini conoscitive;
- la conoscenza delle proprietà meccaniche dei materiali non risente delle incertezze legate alla produzione e posa in opera ma solo della omogeneità dei materiali stessi all'interno della costruzione, del livello di approfondimento delle indagini conoscitive e dell'affidabilità delle stesse;

- i carichi permanenti sono definiti e la loro conoscenza dipende dal livello di approfondimento delle indagini conoscitive.

Si dovrà prevedere l'impiego di metodi di analisi e di verifica dipendenti dalla completezza e dall'affidabilità dell'informazione disponibile e l'uso, nelle verifiche di sicurezza, di adeguati "fattori di confidenza", che modificano i parametri di capacità in funzione del livello di conoscenza relativo a geometria, dettagli costruttivi e materiali.

Deve altresì specificarsi che i contenuti del Cap.8 delle NTC 2018 costituiscono un riferimento generale che può essere integrato, in casi particolari, da valutazioni specifiche ed anche alternative da parte del progettista, comunque basati su criteri e metodi di comprovata validità.

Come indicato al §8.5 del DM 2018, nelle costruzioni esistenti le situazioni concretamente riscontrabili sono le più diverse ed è quindi impossibile prevedere regole specifiche per tutti i casi.

Di conseguenza, il modello per la valutazione della sicurezza dovrà essere definito e giustificato dal Progettista, caso per caso, in relazione al comportamento strutturale attendibile della costruzione. Per una corretta identificazione dell'organismo strutturale il DM 2018 suggerisce una strategia di indagine volta alla progressiva acquisizione di informazioni tecniche e storiche dell'opera. Nell'ordine la norma individua le seguenti fasi: Analisi storico critica, Rilievo e Caratterizzazione meccanica dei materiali, finalizzate al conseguimento del Livello di Conoscenza.

### **Analisi storico critica**

Al §8.5.1 la norma (DM 2018) stabilisce che ai fini di una corretta individuazione del sistema strutturale esistente e del suo stato di sollecitazione è importante ricostruire il processo di realizzazione e le successive modificazioni subite nel tempo dal manufatto, nonché gli eventi che lo hanno interessato. Di particolare importanza è il reperimento degli elaborati progettuali originali.

Le indagini storiche, con particolare riferimento alle norme che hanno regolato la costruzione, forniscono un sussidio complementare qualora gli elaborati progettuali risultassero parzialmente disponibili, incompleti o difformi. Sulla base dei dati raccolti nella fase di ricerca storica, si possono trarre conclusioni di tipo operativo per la modellazione meccanica globale.

### **Rilievo**

Al §8.5.2 la norma (DM 2018) specifica che il rilievo geometrico-strutturale dovrà essere riferito sia alla geometria complessiva dell'organismo che a quella degli elementi costruttivi, comprendendo i rapporti con le eventuali strutture in aderenza. Nel rilievo dovranno essere rappresentate le modificazioni intervenute nel tempo, come desunte all'analisi storico-critica. Il rilievo deve individuare l'organismo resistente della costruzione, tenendo anche presente la qualità e lo stato di conservazione dei materiali e degli elementi costitutivi. Dovranno altresì essere rilevati i dissesti, in atto o stabilizzati, ponendo particolare attenzione all'individuazione dei quadri fessurativi e dei meccanismi di danno. Anche al §8.5.2 della circolare 617/2009 si specifica che un passo fondamentale nell'acquisizione dei dati necessari a mettere a punto un modello di calcolo accurato di una costruzione esistente è costituito dalle operazioni di rilievo della geometria strutturale. Il rilievo si compone di un insieme di procedure relazionate e mirate alla conoscenza della geometria esterna delle strutture e dei dettagli costruttivi. Questi ultimi possono essere occultati alla vista (ad esempio disposizione delle armature nelle strutture in c.a.) e possono richiedere rilievi a campione e valutazioni estensive per analogia.

### **Caratterizzazione meccanica dei materiali**

Al §8.5.3 è stabilito che il piano delle indagini fa comunque parte sia della fase diagnostica che del progetto vero e proprio, e dovrà essere predisposto nell'ambito di un quadro generale volto a mostrare le motivazioni e gli obiettivi delle indagini stesse.

Le indagini dovranno essere attendibili ed in numero statisticamente significativo. Un aiuto, non esaustivo, ai fini della definizione delle resistenze dei materiali può ricavarsi dalle norme dell'epoca della costruzione.

La norma è prevalentemente indirizzata a fornire indicazioni su edifici e per questi fornisce riferimenti sul quantitativo di indagini da eseguire sui materiali. Nel caso di opere diverse è opportuno di volta in volta

stabilire un programma di indagini congruo soprattutto in riferimento alle dimensioni volumetriche strutturali dell'opera.

### **Livelli di conoscenza e fattori di confidenza**

Il DM 2018 stabilisce al §8.5.4 che sulla base degli approfondimenti effettuati nelle fasi conoscitive sopra riportate, saranno individuati i "livelli di conoscenza" dei diversi parametri coinvolti nel modello (geometria, dettagli costruttivi e materiali), e definiti i correlati fattori di confidenza, da utilizzare come ulteriori coefficienti parziali di sicurezza che tengono conto delle carenze nella conoscenza dei parametri del modello. Una guida alla stima dei fattori di confidenza da utilizzare, in relazione ai livelli di conoscenza raggiunti, è fornita nella Appendice C8A della Circolare 617/2009.

## **7 - Indicazioni specifiche concernenti l'acquisizione dei dati per la valutazione della sicurezza delle opere accessorie e di scarico in c.a.**

Così come indicato al §C.8.A.1.B le fonti da considerare per l'acquisizione dei dati necessari sono:

- documenti di progetto con particolare riferimento a relazioni geologiche, geotecniche e strutturali ed elaborati grafici strutturali;
- eventuale documentazione acquisita in tempi successivi alla costruzione;
- rilievo strutturale geometrico e dei dettagli esecutivi;
- prove in-situ e in laboratorio.

In generale saranno acquisiti dati sugli aspetti seguenti:

- identificazione dell'organismo strutturale e verifica del rispetto dei criteri di regolarità indicati al § 7.2.2 delle NTC, sulla base dei disegni originali di progetto opportunamente verificati con indagini in-situ, oppure con un rilievo ex-novo;
- identificazione delle strutture di fondazione;
- identificazione delle categorie di suolo secondo quanto indicato al § 3.2.2 delle NTC;
- informazione sulle dimensioni geometriche degli elementi strutturali, dei quantitativi delle armature, delle proprietà meccaniche dei materiali, dei collegamenti;
- informazioni su possibili difetti locali dei materiali;
- informazioni su possibili difetti nei particolari costruttivi (dettagli delle armature, eccentricità travi-pilastro, eccentricità pilastro-pilastro, collegamenti trave-colonna e colonna-fondazione, etc.);
- informazioni sulle norme impiegate nel progetto originale incluso il valore delle eventuali azioni sismiche di progetto;
- informazione sulla natura e l'entità di eventuali danni subiti in precedenza e sulle riparazioni effettuate.

Il numero delle prove e la localizzazione dovrà essere tale da pervenire ad un livello di conoscenza di **LC3: Conoscenza accurata**, e pertanto:

**Geometria:** la geometria della struttura è nota o in base a un rilievo o dai disegni originali. In quest'ultimo caso è effettuato un rilievo visivo a campione per verificare l'effettiva corrispondenza del costruito ai disegni. I dati raccolti sulle dimensioni degli elementi strutturali, insieme a quelli riguardanti i dettagli strutturali, saranno tali da consentire la messa a punto di un modello strutturale idoneo ad un'analisi lineare o non lineare. Ulteriori specifiche per le strutture in c.a. e acciaio sono fornite al §C8A.1.B.5 e §C8A.1.B.6 della Circolare 617/2009.

**Dettagli costruttivi:** i dettagli sono noti o da un'esaustiva verifica in-situ oppure dai disegni costruttivi originali. In quest'ultimo caso è effettuata una limitata verifica in-situ delle armature e dei collegamenti presenti negli elementi più importanti. I dati raccolti saranno tali da consentire, nel caso si esegua un'analisi lineare, verifiche locali di resistenza, oppure la messa a punto di un modello strutturale non lineare.

**Proprietà dei materiali:** informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali sono disponibili in base ai disegni costruttivi o ai certificati originali, o da esaustive verifiche in-situ. Nel primo caso sono anche eseguite estese prove in-situ; se i valori ottenuti dalle prove in-situ sono minori di quelli disponibili dai disegni o dai certificati originali, sono eseguite esaustive prove in-situ. I dati raccolti saranno tali da consentire, nel caso si esegua un'analisi lineare, verifiche locali di resistenza, oppure la messa a punto di un modello strutturale non lineare.

La valutazione della sicurezza nel caso di conoscenza accurata verrà eseguita mediante metodi di analisi lineare o non lineare, statici o dinamici.

La norma (DM 2018) fornisce le seguenti definizioni finalizzate all'individuazione della geometria, dei dettagli costruttivi e delle proprietà dei materiali.

### **Geometria (carpenterie)**

*Disegni originali di carpenteria:* descrivono la geometria della struttura, gli elementi strutturali e le loro dimensioni, e permettono di individuare l'organismo strutturale resistente alle azioni orizzontali e verticali.

*Disegni costruttivi o esecutivi:* descrivono la geometria della struttura, gli elementi strutturali e le loro dimensioni, e permettono di individuare l'organismo strutturale resistente alle azioni orizzontali e verticali. In aggiunta essi contengono la descrizione della quantità, disposizione e dettagli costruttivi di tutte le armature, nonché le caratteristiche nominali dei materiali usati.

*Rilievo visivo:* serve a controllare la corrispondenza tra l'effettiva geometria della struttura e i disegni originali di carpenteria disponibili. Comprende il rilievo a campione della geometria di alcuni elementi. Nel caso di modifiche non documentate intervenute durante o dopo la costruzione, sarà eseguito un rilievo completo descritto al punto seguente.

*Rilievo completo:* serve a produrre disegni completi di carpenteria nel caso in cui quelli originali siano mancanti o si sia riscontrata una non corrispondenza tra questi ultimi e l'effettiva geometria della struttura. I disegni prodotti dovranno descrivere la geometria della struttura, gli elementi strutturali e le loro dimensioni, e permettere di individuare l'organismo strutturale resistente alle azioni orizzontali e verticali con lo stesso grado di dettaglio proprio di disegni originali.

### **Dettagli costruttivi**

*Progetto simulato:* serve, in mancanza dei disegni costruttivi originali, a definire la quantità e la disposizione dell'armatura in tutti gli elementi con funzione strutturale o le caratteristiche dei collegamenti. E' eseguito sulla base delle norme tecniche in vigore e della pratica costruttiva caratteristica all'epoca della costruzione.

*Verifiche in-situ limitate:* servono per verificare la corrispondenza tra le armature o le caratteristiche dei collegamenti effettivamente presenti e quelle riportate nei disegni costruttivi, oppure ottenute mediante il progetto simulato.

*Verifiche in-situ estese:* servono quando non sono disponibili i disegni costruttivi originali come alternativa al progetto simulato seguito da verifiche limitate, oppure quando i disegni costruttivi originali sono incompleti.

*Verifiche in-situ esaustive:* servono quando non sono disponibili i disegni costruttivi originali e si desidera un livello di conoscenza accurata (LC3).

### **Proprietà dei materiali**

*Calcestruzzo:* la misura delle caratteristiche meccaniche si ottiene mediante estrazione di campioni ed esecuzione di prove di compressione fino a rottura.

*Acciaio:* la misura delle caratteristiche meccaniche si ottiene mediante estrazione di campioni ed esecuzione di prove a trazione fino a rottura con determinazione della resistenza a snervamento e della resistenza e deformazione ultima, salvo nel caso in cui siano disponibili certificati di prova di entità conforme a quanto richiesto per le nuove costruzioni, nella normativa dell'epoca.

*Unioni di elementi in acciaio:* la misura delle caratteristiche meccaniche si ottiene mediante estrazione di campioni ed esecuzione di prove a trazione fino a rottura con determinazione della resistenza a snervamento e della resistenza e deformazione ultima.

*Metodi di prova non distruttivi:* Sono ammessi metodi di indagine non distruttiva di documentata affidabilità, che non possono essere impiegati in completa sostituzione di quelli sopra descritti, ma sono consigliati a loro integrazione, purché i risultati siano tarati su quelli ottenuti con prove distruttive. Nel caso del calcestruzzo, è importante adottare metodi di prova che limitino l'influenza della carbonatazione degli strati superficiali sui valori di resistenza.

*Prove in-situ limitate:* servono a completare le informazioni sulle proprietà dei materiali ottenute o dalle normative in vigore all'epoca della costruzione, o dalle caratteristiche nominali riportate sui disegni costruttivi, o da certificati originali di prova.

*Prove in-situ estese:* servono per ottenere informazioni in mancanza sia dei disegni costruttivi, che dei certificati originali di prova, oppure quando i valori ottenuti dalle prove limitate risultano inferiori a quelli riportati nei disegni o certificati originali.

*Prove in-situ esaustive:* servono per ottenere informazioni in mancanza sia dei disegni costruttivi, che dei certificati originali di prova, oppure quando i valori ottenuti dalle prove limitate risultano inferiori a quelli riportati nei disegni o certificati originali, e si desidera un livello di conoscenza accurata (LC3).

## **8 - Approfondimento geologico e geotecnico ai fini della caratterizzazione dei materiali delle opere e delle fondazioni**

Non è generalmente sufficiente una caratterizzazione basata unicamente sugli atti di progetto e/o di collaudo. E' preferibile effettuare campagne di indagine integrative, programmate con specifico riferimento alle valutazioni oggetto di studio e proporzionate all'importanza della diga. Le indagini dovranno consentire la caratterizzazione delle grandezze necessarie per le successive valutazioni, in funzione delle specifiche procedure adottate per le valutazioni stesse.

In presenza di parametri fisico-meccanici di incerta caratterizzazione sperimentale (ad es., la resistenza per attrito delle interfacce), è necessario individuare un intervallo di valori che il parametro può assumere. I limiti di detto intervallo possono essere stabiliti con riferimento ad indicazioni di letteratura. Dovranno quindi essere effettuate analisi parametriche per valutare l'importanza dei singoli fattori sui risultati (vedi NTD D.1.1.3. – Analisi sismiche “*per tenere conto, in modo cautelativo, della incertezza nella determinazione dei parametri del modello*”).

Nel caso di dighe di importanza modesta in zone a bassa sismicità, per le quali sussistono ampi margini per la sicurezza in condizioni sismiche, è possibile ridurre l'onere collegato alle indagini, purché si adottino ulteriori margini di sicurezza nelle verifiche. Come già anticipato, si potranno ad esempio ridurre i parametri di resistenza dei materiali con opportuni fattori di confidenza.

Le fondazioni dovranno essere correttamente ed approfonditamente indagate, fornendo una caratterizzazione geotecnica. Per le dighe fondate su ammassi rocciosi, assume importanza fondamentale lo studio geo-meccanico con l'individuazione e caratterizzazione delle discontinuità. In particolare per le dighe ad arco dovranno essere indagate le spalle dello sbarramento al fine di individuare eventuali cunei *potenzialmente instabili*.

Si raccomanda di utilizzare metodi di analisi statistica per attribuire una distribuzione di probabilità al valore di ciascun parametro di resistenza o deformabilità.

I fattori di confidenza, eventualmente utilizzati per ridurre le resistenze dei materiali, saranno stabiliti dal progettista, che dovrà fornirne espressa motivazione. Ad esempio, un fattore di confidenza definito attraverso il test *t-student* potrà essere applicato alla media campionaria di un dato parametro per tenere conto della significatività del campione. Si suggerisce in tal caso di adottare un livello di confidenza almeno pari al 95%.

In particolare, nel caso di dighe in materiali sciolti, la caratterizzazione dei materiali **in campo dinamico** deve essere effettuata con specifiche prove in situ o in laboratorio; nel caso di forti deformazioni angolari indotte da sismi di intensità elevata, devono essere effettuate prove che consentono di determinare le variazioni volumetriche e l'aumento delle pressioni interstiziali durante i carichi ciclici, nonché l'eventuale decadimento della resistenza al crescere delle deformazioni.

In mancanza di prove, o nell'impossibilità di effettuarle per terre a granulometria grossolana, occorre considerare l'influenza della possibile variazione dei parametri di maggiore importanza.

I terreni considerati nel modello (diga e fondazione) devono essere caratterizzati nei riguardi delle deformazioni volumetriche: se risultano avere comportamento contraente, occorre definire l'entità delle

sovrappressioni interstiziali che possono manifestarsi in funzione del numero dei cicli e dell'intensità della deformazioni; se il comportamento è dilatante, occorre considerare la possibile riduzione della resistenza verso valori residui.

È necessario effettuare verifiche a liquefazione per tutti i materiali della diga o della fondazione con caratteristiche granulometriche critiche, specie in presenza di modeste caratteristiche meccaniche.

La verifica all'erosione interna deve prevedere almeno la verifica dell'esistenza dei filtri e della loro validità a livello progettuale.

## **9 - Piano di indagini**

### **9.1 - Strutture in c.a.**

Oltre alle attività di rilievo si dovrà procedere alla caratterizzazione delle proprietà meccaniche dei materiali mediante le più comuni tipologie di prove distruttive e non distruttive. Tali prove sono sostanzialmente finalizzate alla determinazione della resistenza a compressione del calcestruzzo in sito, della resistenza a trazione dell'acciaio da cemento armato e da carpenteria, della resistenza a compressione della muratura.

Dovrà pertanto essere progettato specifico piano di indagini che dovrà tenere conto delle dimensioni delle opere e della ripetitività o variabilità degli elementi strutturali.

La percentuale degli elementi da verificare ed il numero di provini da estrarre e sottoporre a prove di resistenza vanno adattati ai singoli casi, tenendo conto dei seguenti aspetti:

(a) nel controllo del raggiungimento delle percentuali di elementi indagati ai fini del rilievo dei dettagli costruttivi si dovrà tenere conto delle eventuali situazioni ripetitive, che consentano di estendere ad una più ampia percentuale i controlli effettuati su alcuni elementi strutturali facenti parte di una serie con evidenti caratteristiche di ripetibilità, per uguale geometria e ruolo nello schema strutturale;

(b) le prove sugli acciai sono finalizzate all'identificazione della classe dell'acciaio utilizzata con riferimento alla normativa vigente all'epoca di costruzione; ai fini del raggiungimento del numero di prove sull'acciaio necessario per il livello di conoscenza è opportuno tenere conto dei diametri (nelle strutture in c.a.) o dei profili (nelle strutture in acciaio) di più diffuso impiego negli elementi principali con esclusione delle staffe;

(c) ai fini delle prove sui materiali è consentito sostituire alcune prove distruttive, non più del 50%, con un più ampio numero, almeno il triplo, di prove non distruttive, singole o combinate, tarate su quelle distruttive.

(d) il numero di provini può esser variato, in aumento o in diminuzione, in relazione alle caratteristiche di omogeneità del materiale; nel caso del calcestruzzo in opera tali caratteristiche sono spesso legate alle modalità costruttive tipiche dell'epoca di costruzione e del tipo di manufatto, di cui occorrerà tenere conto nel pianificare l'indagine; sarà opportuno, in tal senso, prevedere l'effettuazione di una seconda campagna di prove integrative, nel caso in cui i risultati della prima risultino fortemente disomogenei.

**Il piano delle indagini potrà essere sottoposto da parte della Stazione Appaltante all'Organo di Vigilanza per la necessaria autorizzazione preventiva. In ogni caso i tempi necessari non verranno computati ai fini della durata contrattuale.**

Per quanto riguarda le indagini di tipo strutturale, si elencano di seguito alcune tipologie di prove che dovranno essere previste sui manufatti, fermo restando la possibilità di programmare ulteriori prove necessarie per il raggiungimento del livello di conoscenza richiesta.

#### **Prove distruttive**

La caratterizzazione delle proprietà meccaniche dei materiali sarà principalmente basata su prove meccaniche invasive generalmente classificate come distruttive. Di seguito si illustrano le tipologie di prove di cui si propone l'utilizzo per la determinazione della resistenza a compressione del calcestruzzo in sito, della resistenza a trazione dell'acciaio da cemento armato e da carpenteria, della resistenza a compressione della muratura.

Quando le prove sono programmate su campioni da prelevare in sito, occorre porre attenzione a che i prelievi siano eseguiti nelle zone di minor sollecitazione degli elementi strutturali interessati. Il tecnico dovrà valutare, ad esempio nel caso della casa di guardia, sotto la sua responsabilità, l'opportunità di ricorrere al puntellamento fin quando i danni prodotti dal prelievo non saranno ripristinati.

### **Carotaggio e prova di compressione monoassiale**

La valutazione della resistenza del calcestruzzo in opera si basa comunemente sulla determinazione della resistenza a compressione mediante una prova di compressione monoassiale eseguita in laboratorio su provini cilindrici estratti da elementi strutturali di edifici e manufatti in genere esistenti. Per quanto riguarda le procedure per l'estrazione, la lavorazione dei campioni estratti per ottenere i provini e le relative modalità di prova a compressione si può fare riferimento alle norme UNI EN 12504-1:2009 "*Prelievo sul calcestruzzo nelle strutture – Carote – Prelievo, esame e prova di compressione*". L'operazione di carotaggio dovrà essere prevista in modo tale da minimizzare l'influenza del carotaggio stesso sui risultati della prova di compressione. I risultati delle prove devono essere riportati in rapporti di prova emessi da laboratori di cui all'art. 59 del DPR n. 380/2001. Noto il risultato delle prove di compressione, la restituzione della resistenza cubica e cilindrica del calcestruzzo in opera avviene mediante il ricorso a correlazioni di letteratura di comprovata validità; i risultati delle prove di compressione sulle carote saranno corretti tenendo conto dell'influenza della geometria del campione e di tutti i fattori perturbativi che caratterizzano il prelievo. Noti i valori medi delle resistenze in sito, i valori caratteristici delle resistenze cubiche e cilindriche si possono dedurre dalle correlazioni proposte al paragrafo 11.2.10.1 delle vigenti NTC08 e ss.mm.ii.. Gli altri parametri costitutivi del calcestruzzo possono dedursi dalle correlazioni proposte dalle stesse NTC08 e s.m.i. ai paragrafi 11.2.10.2 e 11.2.10.3. In esito alle prove di compressione il tecnico dovrà produrre una relazione con il procedimento adottato per la determinazione della resistenza in opera, le formule di correlazione adottate e i relativi riferimenti bibliografici. Alla relazione dovrà essere allegata la documentazione fotografica relativa a ogni carota appena estratta e a ogni prova di compressione.

### **Prova di carbonatazione**

La prova di carbonatazione è finalizzata alla determinazione dello spessore carbonatato di calcestruzzo sulle carote appena estratte. Si può fare riferimento alle norme UNI 9944 "Corrosione protezione dell'armatura del calcestruzzo". I risultati della prova devono essere rappresentati in forma tabellare e contenere l'indicazione dell'elemento strutturale oggetto di prelievo, della posizione di prelievo del campione, della sigla identificativa del campione e degli spessori di calcestruzzo carbonatato misurati a partire dalle due estremità della carota. Le ubicazioni delle aree di prova dovranno essere chiaramente indicati su piante, sezioni e prospetti in scala 1:100. L'indagine dovrà essere documentata da immagini fotografiche di ogni campione con particolare riferimento ai momenti prima e dopo l'esecuzione della prova.

### **Prove sull'acciaio per cemento armato**

Salvo nel caso in cui siano disponibili certificati di prova di entità conforme a quanto richiesto per le nuove costruzioni nella normativa dell'epoca di edificazione del fabbricato in esame, l'identificazione della classe dell'acciaio in un edificio e/o manufatto esistente si ottiene mediante estrazione di campioni di armatura su cui eseguire prove di trazione fino a rottura con determinazione della resistenza a snervamento e dell'allungamento a rottura. Per l'esecuzione della prova di trazione si può far riferimento alle NTC08 e s.m.i. e alla norma UNI EN ISO 6892-1:2009 "*Materiali metallici – prova di trazione*". Per tutti gli spezzoni di armatura testati deve essere prodotto un rapporto ufficiale di prova emesso da laboratori di cui all'art. 59 del DPR n. 380/2001. Le ubicazioni degli elementi strutturali oggetto di prelievo e le posizioni dei campioni prelevati dovranno essere chiaramente indicati su piante e sezioni e/o prospetti (in caso di edifici) in scala 1:100. Alla relazione dovrà essere allegata la documentazione fotografica relativa a tutte le fasi di prova.

### **Prove non distruttive**

Nella determinazione delle proprietà meccaniche dei materiali, dovranno essere effettuate estese indagini non distruttive che, non possono essere impiegate in completa sostituzione dei metodi distruttivi, ma solo a loro integrazione, purché i risultati siano tarati su quelli ottenuti dalle prove distruttive.

### **Prova sclerometrica**

L'indagine sclerometrica, è finalizzata alla valutazione della durezza superficiale del calcestruzzo e può essere utilizzato per valutarne l'omogeneità in sito, per stimare le variazioni nel tempo delle proprietà meccaniche e per individuare zone di degrado del calcestruzzo. La resistenza del calcestruzzo può essere valutata in funzione dell'indice di rimbalzo utilizzando il diagramma fornito dal costruttore dello strumento.

La normativa di riferimento per le prove sclerometriche è la UNI EN 12504-2:2012 "*Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Prove non distruttive - Determinazione dell'indice sclerometrico*". Il report delle prove sclerometriche deve contenere una chiara indicazione delle aree di indagine su piante, sezioni e prospetti strutturali in scala 1:100. Per ciascuna area indagata devono essere riportati in forma tabellare l'eventuale codice identificativo dell'area di prova, l'elemento strutturale oggetto di prova, gli indici di rimbalzo di tutte le battute, il valore dell'indice di rimbalzo medio, la posizione dello strumento (verticale, orizzontale, inclinato) e la resistenza stimata del calcestruzzo. Dovrà essere, inoltre, allegata la documentazione fotografica relativa alla prova su DVD.

### **Prova sonica**

Nel caso del conglomerato cementizio il metodo ultrasonico è utilizzato per valutare l'omogeneità in situ e stimare la resistenza degli elementi strutturali. Oltre che per la stima della resistenza meccanica del calcestruzzo, le prove ultrasoniche consentono di rilevare:

- il grado di omogeneità del materiale;
- la presenza di vuoti, lesioni o discontinuità delle strutture;
- i difetti di getto;
- le eventuali variazioni delle proprietà nel tempo causate dalla storia dell'elemento (manutenzione, sollecitazioni, degrado, ecc.).

La normativa di riferimento per le prove ultrasoniche è la UNI EN 12504-4:2005 "*Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici*". In esito alle prove soniche il tecnico deve produrre una relazione contenente una chiara indicazione delle aree di indagine su piante, sezioni e prospetti strutturali in scala 1:100. Per ciascuna area indagata devono essere riportati in forma tabellare l'eventuale codice identificativo dell'area di prova, l'elemento strutturale oggetto di prova, le velocità misurate e la resistenza stimata del calcestruzzo. Dovrà essere, inoltre, allegata la documentazione fotografica relativa alla prova su DVD.

### **Metodo sonreb**

Il metodo Sonreb consiste nella combinazione dei risultati dell'indagine ultrasonica e sclerometrica con l'obiettivo di ottenere risultati più attendibili sulla stima della resistenza a compressione del calcestruzzo. Il metodo consente di superare gli errori che si ottengono utilizzando separatamente il metodo sclerometrico, che è un metodo di indagine superficiale, e il metodo ultrasonico, che invece è un metodo di indagine volumetrico. In pratica la combinazione delle due tecniche di indagine permette di correlare la resistenza meccanica misurata in superficie (prova sclerometrica) con la tessitura strutturale in profondità (trasmissione ultrasuoni), coinvolgendo in definitiva l'intero corpo della struttura indagata. Per il report dei risultati si può far riferimento a quanto richiesto separatamente per le singole prove ma, in aggiunta deve essere indicata, per ogni area di indagine la resistenza stimata del calcestruzzo ottenuta combinando i risultati dei due metodi mediante formule di letteratura, di comprovata validità, di cui si dovrà indicare il riferimento bibliografico.

### **Prova pacometrica**

La prova pacometrica è finalizzata al rilievo delle armature su manufatti per i quali non è nota la disposizione delle armature e consente di conoscere la loro effettiva posizione e il loro numero, senza danneggiare la struttura in esame. L'utilizzo del pacometro, come strumento di prova non distruttivo, è regolato dalle norme BS 1881- 204:1988 "*Testing concrete. Recommendations on the use of electromagnetic covermeters*".

### **Prova termografica**

L'analisi termografica deve essere condotta in modo esteso al fine di individuare la presenza di strutture, modificazioni della stessa, giunti sismici o comunque elementi non visibili ad occhio nudo. La relazione finale dell'indagine termografica deve contenere una pianta in scala 1:100 con l'indicazione delle pareti murarie oggetto di indagine. Per ciascuna di esse dovranno essere riportate le immagini termografiche, in scala opportuna, con una legenda che associ ad ogni colore il corrispondente intervallo di temperatura. I risultati dovranno essere forniti anche in formato DWG. La relazione, inoltre, dovrà contenere una

descrizione dei risultati ottenuti e la loro interpretazione ai fini del rilievo di tutti gli aspetti di cui sopra in tutti gli elementi strutturali indagati.

## 9.2 - Corpo diga, sponde e terreni di fondazione

Un ruolo chiave nella caratterizzazione geotecnica - sismica occupano le indagini geofisiche di tipo sismico, che rappresentano il metodo di elezione per una misura della velocità di propagazione delle onde di taglio e quindi del parametro  $V_{s30}$ , normativamente idoneo alla individuazione delle categorie di sottosuolo di riferimento, necessarie alla definizione dell'azione sismica di progetto mediante l'approccio semplificato richiesto dalle NTC2018.

Potranno prevedersi, laddove ritenuto necessario:

- 1) prove geofisiche di superficie (sismica a rifrazione, riflessione) per la valutazione della morfologia del bedrock e della stratigrafia di massima su tutto lo sviluppo dell'invaso;
- 2) misure di  $V_s$  con metodi non invasivi ed a basso costo o con sistemi ad energizzazione attiva (ad es. Sasw o Masw) o ad energizzazione passiva (tipo ReMi, Esac, Spac) a valle della diga;
- 3) indagini dirette di rilevamento per riconoscere, quantificare e cartografare le unità geologiche suscettibili di amplificazione sismica, instabilità dei pendii e liquefazione in accordo con l'OPCM n. 3274/2003 e NTC2018;
- 4) un sondaggio sul coronamento delle sponde della diga che arrivi sino al piano di fondazione per verificare la condizione del terreno di sottofondazione;
- 5) analisi spettrale dei microtremiti ambientali a stazione singola (tipo Tromino), che attraverso l'inversione delle curve dei rapporti spettrali H/V, consentono di stimare oltre alla frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo il profilo sismo-stratigrafico delle onde  $V_s$ . Le misure con il Tromino sono da estendere a tutte le sponde al fine di redigere una carta delle frequenze.

La caratterizzazione geotecnica di un deposito di terreno richiede la definizione di informazioni che possono essere raggruppate in:

- proprietà fisiche e parametri di stato;
- parametri di comportamento;
- caratteri strutturali.

Le proprietà fisiche sono quelle proprietà dei terreni riferibili a grandezze fisiche come pesi, volumi e dimensioni geometriche dei grani. I parametri di stato invece sono quei parametri che descrivono lo stato iniziale del deposito di terreno ed includono le tensioni litostatiche, la storia dello stato tensionale e deformazionale, la porosità, la distribuzione spaziale dei grani o delle particelle, il grado di saturazione, e per i materiali a grana fine la curva di compressibilità intrinseca del materiale.

Laddove i dati messi a disposizione dalla Stazione Appaltante non fossero ritenuti motivatamente sufficienti dall'Appaltatore, ai fini del raggiungimento del livello di conoscenza richiesto, dovrà essere pertanto previsto apposito programma di indagini geotecniche comprendente:

- prove geofisiche accoppiate al sondaggio per identificare la geometria e le proprietà fisiche dei materiali che costituiscono il sottosuolo (profilo stratigrafico);
- le proprietà fisiche e meccaniche dei terreni costituenti il sottosuolo saranno determinate per mezzo di prove da eseguire in laboratorio su campioni di terreno indisturbati (pesi di volume, granulometria, contenuto d'acqua). A queste potranno essere accoppiate prove in situ;
- misure di permeabilità e consolidazione, analisi della risposta dei terreni sotto falda ad una variazione del regime idraulico o tensionale. Le NTC2018 al Cap. 6 Paragrafo 5.1 prescrivono di estendere le indagini geofisiche in modo tale da consentire la verifica delle condizioni di stabilità locale e globale del complesso opera-terreno, tenendo in considerazione eventuali moti di filtrazione;
- misura delle pressioni interstiziali mediante piezometri.

La caratterizzazione geotecnica dei terreni ai fini sismici prevede la definizione delle seguenti caratteristiche:

- peso dell'unità di volume  $\gamma$  (dei terreni);
- profilo della velocità delle onde di taglio  $V_s$  del terreno;

- curve di decadimento del modulo di taglio ( $G/G_0 - \gamma$ ) e di incremento del fattore di smorzamento ( $D - \gamma$ );
- stima degli eccessi di pressione interstiziale.

Per la determinazione delle proprietà dinamiche dei terreni si ricorrerà alle prove geofisiche, sopra indicate, affiancate a prove di laboratorio per determinare  $G_0$  e  $D_0$  e le leggi  $G(\gamma)$  e  $D(\gamma)$  in un campo di deformazioni ben più ampio e sotto condizioni accurate, controllate e riproducibili di sollecitazione e deformazione.

Si prevedono pertanto prove di colonna risonante e triassiale ciclico per dare una definizione completa del comportamento dinamico dei terreni di nostro interesse. I due gruppi di prove, in situ (geofisiche) e in laboratorio (colonna risonante e triassiale ciclico), sono complementari, infatti le prime forniscono una caratterizzazione alle piccole deformazioni, mentre le prove di laboratorio definiscono il comportamento del terreno in tutto il campo di deformazioni.

## 10 - Stati limite di riferimento

La valutazione della sicurezza dei serbatoi (inteso come l'insieme dello sbarramento e delle sponde naturali), con riferimento al D.M. 26/06/2014, deve prendere in considerazione i seguenti stati limite:

- Stati limite di esercizio
  - Stato limite di operatività (SLO)
  - Stato limite di danno (SLD)
- Stati limite ultimi
  - Stato limite di salvaguardia della vita (SLV)
  - Stato limite di collasso (SLC)

Secondo quanto prescritto dal D.M. 26/06/2014, la valutazione della sicurezza dei serbatoi deve essere effettuata con riferimento alle seguenti condizioni caratteristiche:

- normale funzionamento(SLO);
- passaggio dalla condizione di danni riparabili, senza rilascio incontrollato di acqua a danni non riparabili, senza rilascio incontrollato di acqua (SLD);
- danni che determinano il rilascio incontrollato di acqua, o comunque rischio di perdite di vite umane (SLV);
- collasso della struttura (SLC).

Per ciò che riguarda specificatamente gli organi di scarico e le opere accessorie, deve essere presa in considerazione la situazione, corrispondente al raggiungimento dello stato limite ultimo associato alla perdita non controllata dell'acqua invasata, come evincibile dal seguente elenco degli stati limite da considerare in generale:

1. instabilità del corpo diga e dei terreni o ammassi rocciosi di imposta;
2. instabilità per scorrimento, anche parziale, del corpo diga o meccanismi di rottura locali;
3. rottura per erosione interna; fessurazioni nel corpo diga, nei terreni o ammassi rocciosi di fondazione, negli elementi di tenuta o nelle superfici di contatto manufatto-terreno, tali da provocare una filtrazione incontrollata;
4. deformazioni del corpo diga e/o dei terreni o ammassi rocciosi di fondazione, tali da provocare danni strutturali allo sbarramento o la tracimazione;
5. instabilità dei pendii che possano provocare la tracimazione della diga o danni strutturali;
6. rottura o danno degli organi di scarico e in generale delle opere accessorie, che impediscano il deflusso controllato dal serbatoio;
7. condizione di piena che porti alla tracimazione del coronamento con conseguenti danni gravi fino alla possibilità di collasso dello sbarramento.

I principali stati limite di esercizio da considerare sono:

- eccesso di tensioni o deformazioni del corpo diga e/o nei terreni di fondazione;
- danneggiamento degli organi di scarico superficiali o profondi;

- danneggiamento delle opere di derivazione;
- danneggiamento dei sistemi di misura e controllo.

## 11 - Azione sismica

Sotto l'effetto delle azioni sismiche, per lo sbarramento è sufficiente prendere in considerazione lo SLD (Stato Limite di Danno) e lo SLC (Stato Limite di Collasso).

Se in base alla pericolosità sismica di riferimento (NTC) risulta  $a_g(T_R = 475) \geq 0.15g$ , è necessario effettuare uno studio sismotettonico avente due finalità:

- definire l'azione sismica di riferimento per il sito in termini di spettro di risposta elastico in accelerazione, tenendo conto dei caratteri sismogenetici dell'area in esame e della risposta sismica locale RSL. L'azione sismica così definita non deve comunque risultare meno gravosa di quella derivante dalle indicazioni di norma;
- individuare la presenza di strutture sismogenetiche potenzialmente in grado di produrre fagliazione di superficie in corrispondenza dello sbarramento o delle opere di scarico e derivazione. In tale eventualità occorre chiarire l'entità degli spostamenti attesi in termini probabilistici.

Devono essere valutati gli effetti della risposta sismica locale. Il metodo semplificato previsto al § 3.2.2 delle NTC, basato sull'attribuzione del sito a una categoria stratigrafica (A-E) può essere utilizzato solamente quando l'ammasso di fondazione sia privo di forti contrasti di impedenza, o quando il substrato rigido si trovi a una profondità superiore a 30 m. Negli altri casi dovranno essere effettuate specifiche analisi di RSL.

Per le analisi dinamiche al passo è necessario ricorrere ad una descrizione dell'azione sismica mediante accelerogrammi. Si dovranno utilizzare accelerogrammi registrati, selezionati e scalati secondo i criteri indicati nel seguito. Ciascun accelerogramma descrive una componente, orizzontale o verticale, dell'azione sismica; l'insieme delle tre componenti (due orizzontali, tra loro ortogonali, ed una verticale), registrate nello stesso evento, costituisce un gruppo di accelerogrammi.

Il numero minimo di gruppi di accelerogrammi per le analisi dinamiche al passo è pari a 3 per le dighe in muratura e 5 per le dighe in materiali sciolti. Le grandezze di risposta da utilizzare per le verifiche corrispondono a quelle più gravose ottenute con i diversi gruppi di accelerogrammi. Se si utilizzano almeno sette gruppi di accelerogrammi, gli effetti sulla struttura sono rappresentati dai valori medi degli effetti più sfavorevoli ottenuti.

L'insieme di accelerogrammi dovrà rispettare criteri di compatibilità con lo spettro di risposta elastico di riferimento. E' possibile riferirsi ai criteri di compatibilità formulati da normative italiane o internazionali. Nel caso di modelli di calcolo tridimensionali, si raccomanda di adottare un criterio di compatibilità che tenga adeguatamente conto di entrambe le componenti orizzontali del moto.

È ammessa la scalatura in ampiezza degli accelerogrammi (evitando di modificarne il contenuto in frequenza) e cercando di limitare il valore del fattore di scala. Lo stesso fattore di scala dovrà essere applicato alle due componenti accelerometriche orizzontali di ciascun gruppo; un diverso fattore di scala potrà essere adottato per la componente verticale.

Si suggerisce di adottare un numero di accelerogrammi superiore ai minimi sopra specificati qualora sia necessaria una migliore approssimazione dell'azione sismica di riferimento.

## 12 - Studio sismotettonico: pericolosità sismica

Nello studio di pericolosità sismica (che le NTC precisano essere obbligatorio allorché per il sito in esame  $a_g(T_R = 475)$  delle NTC  $\geq 0.15g$ ), si raccomanda di valutare per l'area in esame tutte le informazioni aggiuntive, a scala regionale, che consentano di migliorare l'attendibilità delle previsioni della Norma. Ciò sia per distribuzione, estensione e localizzazione delle aree sismogenetiche, sia per leggi di attenuazione specifiche, ritenute maggiormente rappresentative dell'area in esame. In assenza di tali informazioni aggiuntive è del tutto inutile la mera ripetizione delle procedure implementate per la mappa di pericolosità italiana delle NTC.

Lo studio di pericolosità sismica può essere condotto con un approccio probabilistico (PSHA) ovvero deterministico (DSHA). Entrambi gli approcci possono essere adottati per valutare lo spettro di risposta dell'evento utilizzato per la verifica allo SLC, avendo comunque cura di esporre le motivazioni a supporto

della scelta fatta. Ovviamente l'azione corrispondente allo SLD deve essere valutata con l'approccio probabilistico.

In tutti i casi è necessario ricordare che i risultati dello studio di pericolosità sono fortemente condizionati dalle relazioni di attenuazione (GMPE) utilizzate. Per la mappa di pericolosità sismica MPS04 sono stati utilizzati quattro insiemi di relazioni definite sulla base di dati europei (ASB96: Ambraseys et al., 1996), italiani (SP96: Sabetta-Pugliese, 1996), e locali (REG.A: relazioni regionalizzate con set A di profondità, REG.B: relazioni regionalizzate con set B di profondità, proposte da Malagnini et al., 2000-2002 e da Morasca et al., 2006).

L'uso di relazioni di attenuazione diverse da quelle adottate dalla vigente mappa di pericolosità è ammesso, purché motivato da specifiche considerazioni legate ai caratteri della sismicità locale.

Si dovrà inoltre tenere conto dei meccanismi di faglia associati alle strutture sismogenetiche.

Nella valutazione del massimo terremoto credibile MCE secondo l'approccio deterministico, particolare attenzione va posta alla stima dei valori di magnitudo massima associata a ciascuna sorgente sismogenetica; l'origine di tali valori (dato storico, ovvero derivante da considerazioni sismologiche e geofisiche) deve essere indicata. Inoltre, per determinare i parametri di scuotimento si utilizzerà l'84° percentile delle leggi di attenuazione.

Al riguardo comunque, costituiranno riferimento le "Linee-guida per la redazione e le istruttorie degli studi sismotettonici relativi alle grandi dighe", predisposte nell'ambito dell'"Accordo ai sensi dell'art. 15 della l. 241/90 e ss.mm.ii. tra la Direzione Generale per le Dighe e le Infrastrutture Idriche ed Elettriche del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti e l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia per la redazione di linee-guida per gli studi sismotettonici finalizzati alla rivalutazione della pericolosità sismica dei siti delle grandi dighe".

### **13 - Selezione e scalatura degli accelerogrammi**

Per la selezione degli accelerogrammi da utilizzare nelle analisi dinamiche si ricorre alle banche dati rese disponibili da organismi istituzionali italiani o stranieri.

E' innanzitutto necessario soddisfare i criteri di sismo-compatibilità: le registrazioni selezionate devono essere compatibili con il modello sismotettonico regionale, la magnitudo e la distanza epicentrale di uno o più eventi di scenario e con le caratteristiche geotecniche delle stazioni di registrazione dei segnali rispetto a quelle del sito di costruzione. Questo criterio va applicato nella fase di preselezione dei segnali.

I gruppi di accelerogrammi registrati devono essere selezionati e scalati in modo tale che i relativi spettri di risposta approssimino gli spettri di risposta elastici nel campo dei periodi propri di vibrazione di interesse per il problema in esame.

L'intervallo di periodi di interesse deve essere stabilito dal progettista con riferimento alle caratteristiche dinamiche del caso in esame. L'intervallo 0,15 – 2 s, proposto dalle norme per le costruzioni civili non è necessariamente valido per le dighe, la cui risposta è spesso condizionata dalle alte frequenze. Pertanto, per la singola diga in esame, il progettista dovrà stabilire, dandone motivazione, un intervallo di frequenze di interesse; si dovrà inoltre tenere conto delle eventuali modifiche di rigidità conseguenti all'entrata in campo non lineare dello sbarramento o delle sue parti.

Nello specifico, la compatibilità con lo spettro di risposta elastico deve essere verificata in base alla media delle ordinate spettrali ottenute con i diversi accelerogrammi per un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente  $\xi$  del 5%. L'ordinata spettrale media non deve presentare uno scarto in difetto superiore al 10% ed uno scarto in eccesso superiore al 30%, rispetto alla corrispondente componente dello spettro elastico, in alcun punto dell'intervallo dei periodi di vibrazione di interesse per l'opera in esame per i diversi stati limite.

Nel caso di analisi 2D, l'applicazione del suddetto criterio di spettro-compatibilità è immediata. La compatibilità delle componenti orizzontali e verticali andrà trattata separatamente. I fattori di scala delle N componenti orizzontali saranno determinati in modo che il loro spettro medio sia compatibile con lo spettro di riferimento. Si procede analogamente per la componente verticale.

Nel caso di analisi tridimensionale, l'applicazione del criterio di spettro-compatibilità comporta l'adozione di un unico fattore di scala per entrambe le componenti orizzontali. È possibile riferirsi ai criteri di compatibilità multi componente formulati da normative internazionali (es. ASCE 7).

Una possibile procedura è la seguente:

1. per ogni coppia di registrazioni orizzontali, si ricostruisce uno spettro SRSS [ $S_{SRSS} = (S_x^2 + S_y^2)^{0.5}$ ]
2. le coppie di registrazioni devono essere selezionate in modo tale che lo spettro medio SRSS di tutte le coppie approssimi lo spettro di riferimento, moltiplicato per un coefficiente  $\alpha = 1.41$
3. è possibile scalare ciascuna coppia di registrazioni attraverso un unico fattore di scala, che può differire tra le diverse coppie.

Per le componenti verticali si procede separatamente, come descritto per le analisi piane.

## 14 - Analisi sismiche

L'uso di modelli di calcolo complessi (ad es. non lineari) deve essere accompagnato da una caratterizzazione dei materiali specifica ed approfondita, che consenta di stabilire con adeguata confidenza tutti i parametri del modello. Diversamente, sarà necessario indagare, con studi parametrici, l'influenza di ciascuno di essi. E' comunque necessario confrontare i risultati delle analisi complesse con quelli ottenuti con metodi di analisi più semplici, basati su ipotesi conservative.

L'analisi della risposta sismica deve essere preceduta dall'esame delle condizioni deformative e tensionali in condizioni statiche. Si precisa che, essendo queste analisi finalizzate ad una stima delle condizioni di esercizio, le azioni vanno combinate con i loro valori nominali (coefficienti parziali unitari).

La spinta idrodinamica potrà essere calcolata attraverso una modellazione diretta del fluido (ad es. utilizzando elementi finiti acustici o elementi finiti elastici con opportuni parametri di rigidità), ovvero attraverso metodi semplificati basati sul concetto delle c.d. masse aggiunte. Nel caso di analisi sismiche pseudo-statiche o dinamiche con spettro di risposta, per il calcolo della sovrappressione idrodinamica dovrà adottarsi lo stesso valore di accelerazione utilizzato per il calcolo delle forze di inerzia agenti sulla massa muraria.

La spinta dovuta all'interrimento in condizioni sismiche dovrà essere valutata con i metodi propri della spinta delle terre.

Non è generalmente ammissibile l'utilizzo di un coefficiente di smorzamento superiore al 5%; al contrario, devono essere adottati valori inferiori nel caso in cui i fenomeni di isteresi nei materiali siano modellati esplicitamente adottando legami costitutivi non lineari. L'eventuale utilizzo di un valore superiore al 5% dovrà essere giustificato con riferimento al particolare caso in esame.

Nel caso in cui si adotti un modello di calcolo che simuli la propagazione delle onde sismiche nella roccia di fondazione (cd. fondazione con massa), è necessario effettuare analisi di validazione della soluzione numerica. Tali analisi, che dovranno essere documentate, si basano sul confronto delle soluzioni numeriche, ottenute con il modello, con soluzioni rigorose di letteratura, ottenute con metodi analitici, numerici o misti. Le analisi di validazione potranno eventualmente essere riferite a modelli ausiliari che riproducano le ipotesi alla base delle soluzioni di letteratura. Sarà sempre necessario almeno verificare che il modello sia capace di riprodurre, in campo libero, gli accelerogrammi preventivamente selezionati.

Non è ammesso l'utilizzo del metodo ETA come unico approccio di verifica; lo stesso, che può essere adottato per valutazioni qualitative e quantitative nel contesto di analisi multimetodologiche, deve comunque essere affiancato da analisi dinamiche tradizionali.

## 15 - Combinazione delle azioni

Per le analisi sismiche, le azioni di calcolo vanno combinate con coefficienti parziali ( $\gamma_F$ ) unitari. I coefficienti  $\Psi$  per le azioni variabili sono definiti dalla Norma.

Per ciascuno stato limite (SLD, SLC) andranno in ogni caso considerate le situazioni di serbatoio pieno (livello di invaso alla massima regolazione) e serbatoio vuoto, nelle condizioni termiche più gravose. Livelli di invaso intermedi vanno considerati se significativi.

La combinazione direzionale 100%-300%, prevista dalla Norma per le componenti orizzontali del sisma, può essere utilizzata soltanto per le analisi pseudo-statiche o dinamiche con spettro di risposta. Non è in alcun caso ammissibile l'utilizzo di questa regola di combinazione per le analisi dinamiche al passo.

## 16 - Modello e metodo per le analisi dinamiche

Occorre evitare una eccessiva differenziazione dei materiali, trascurando nel modello di calcolo zone e strati di modesta importanza ed elementi della sezione di spessore trascurabile (scogliera, filtri etc.) dei quali peraltro non si dispone, in genere, dei parametri meccanici.

È pertanto preferibile fare riferimento a modelli più semplici e compiutamente definiti.

Per ciascuna superficie di scorrimento significativa (escludendo quelle corticali) è utile presentare preliminarmente i risultati di un'analisi pseudostatica che esamini la variazione del coefficiente di sicurezza in funzione del coefficiente sismico fino alla condizione  $FS = 1$  ( $K_h = K_{cr}$ ;  $K_v = \pm K_h/2$ ).

Se si ricorre alla procedura di Makdisi e Seed, l'analisi andrà articolata in tre fasi:

1. con il metodo dell'equilibrio limite si calcolano i coefficienti sismici critici ( $K_{cr}$ ) delle superfici di scorrimento, come sopra specificato;
2. con il metodo lineare equivalente, analisi elastica di tipo iterativo, si determina la time-history delle accelerazioni indotte all'interno della diga dal moto sismico;
3. con il metodo di Newmark si valutano i cedimenti permanenti causati dalle accelerazioni impresse alle varie superfici limite; gli accelerogrammi utilizzati nel calcolo degli spostamenti permanenti sono rappresentativi del campo di variazione dell'accelerazione all'interno della superficie di scorrimento (procedura di Chopra).

Deve essere espresso uno specifico giudizio sulla effettiva validità dei risultati ottenuti con riferimento alle ipotesi poste alla base del modello. Il metodo lineare equivalente, infatti, può non fornire valori attendibili quando il campo deformativo indotto dalla sollecitazione dinamica supera la soglia di  $10^{-3} - 10^{-4}$ . Evidenze di insufficienza del modello sono valori di smorzamento localmente superiori al 10% o inconsuete amplificazioni e deamplificazioni delle accelerazioni lungo la verticale.

Per livelli di deformazioni superiori al campo di deformazione sopra indicato, occorre utilizzare metodi non lineari e valutare il possibile incremento di pressione interstiziale o di decadimento della resistenza dei materiali.

## 17 - Giudizio di ammissibilità

Stato Limite di Danno (SLD): le deformazioni permanenti sono accettabili se dell'ordine del centimetro e la risposta sismica risulta connotata da un comportamento essenzialmente elastico.

Stato Limite di Collasso (SLC): lo spostamento massimo è ammissibile se inferiore ad una quota parte della differenza tra la quota di massima ritenuta e la quota sommitale dell'elemento di tenuta. Il cedimento calcolato deve essere confrontato con l'altezza della diga: cedimenti inferiori all'1% dell'altezza della diga sono, in linea generale, accettabili.

Il giudizio ingegneristico motivato di accettabilità dei risultati dovrà anche considerare:

1. il confronto dei risultati ottenuti con valutazioni semplificate degli spostamenti permanenti, che si possono ottenere utilizzando le note correlazioni empiriche proposte da vari Autori;
2. il rischio di perdita di funzionalità dell'elemento di tenuta, quella di integrità dei filtri, anche con riferimento agli spostamenti calcolati lungo le superfici critiche in relazione allo spessore ed alla geometria dei vari strati;
3. l'adeguatezza della strumentazione installata, atta al controllo delle condizioni di sicurezza post-sismiche dello sbarramento, in particolare la misura delle pressioni interstiziali;
4. l'ammissibilità degli spostamenti e delle deformazioni per lo SLD e SLC.