



L'ACQUA

ESTRATTO

Ezio Baldovin, Gian Luca Morelli

RESILIENZA SISMICA DI UNA DIGA IN ROCKFILL CON MANTO BITUMINOSO IN SICILIA



Direttore Responsabile

Armando Brath

direttore@idrotecnicaitaliana.it

Comitato Tecnico-Scientifico

Renata Archetti

Lorenzo Bardelli

Marcello Benedini

Giuseppe Bortone

Bruno Brunone

Paolo Carta

Rosella Caruana

Carlo Ciaponi

Pierluigi Claps

Maria Cristina Collivignarelli

Bernardo De Bernardinis

Paolo De Girolamo

Roberto Deidda

Vittorio Di Federico

Renato Drusiani

Giorgio Federici

Francesco Federico

Marco Franchini

Gabriele Freni

Maurizio Giugni

Andrea Goltara

Salvatore Grimaldi

Ruggiero Jappelli

Goffredo La Loggia

Stefano Lanzoni

Francesco Macchione

Beatrice Majone

Antonio Massarutto

Mario Rosario Mazzola

Giovanni Menduni

Alberto Montanari

Michele Mossa

Francesco Napolitano

Francesco Puma

Roberto Ranzi

Enrico Rolle

Giuseppe Rossi Paradiso

Paolo Salandin

Maria Giovanna Tanda

Attilio Toscano

Lucio Ubertini

Massimo Veltri

Pasquale Versace

Responsabile della Redazione

Olimpia Arcella

328 1205467

arcella.acqua@idrotecnicaitaliana.it

Segretaria di Redazione

Caterina Porfidia

320 7872904

acqua@idrotecnicaitaliana.it

Impaginazione e grafica

PixelStudio

di Michele Massara

pixelstudio@fastwebnet.it

Archivio fotografico

Giorgio Carlini, ACQUE SpA, Pisa

Mara De Donato, GORI SpA,

Ercolano (NA)



In copertina: Vernal Falls, Yosemite National Park (California). Foto di Roberto Jappelli.

Editore

Associazione Idrotecnica Italiana

Via di Santa Teresa, 23 - 00198 ROMA

www.idrotecnicaitaliana.it

e-mail: acqua@idrotecnicaitaliana.it

RIVISTA ASSOCIATA 

Autorizzazione del Tribunale di Roma n. 15595 del 21 agosto 1974

Iscrizione al ROC n. 4201 del 29 agosto 2002

Spedizione in abbonamento postale 70% - ROMA

Le opinioni e i contenuti espressi dagli Autori non impegnano la Direzione

La riproduzione delle illustrazioni e degli articoli pubblicati dalla rivista è riservata e non può avvenire senza l'autorizzazione della Casa Editrice.

Finito di stampare nel mese di marzo 2020 da Romana Editrice srl - Via dell'Enopolio, 37 - 00030 San Cesario (RM)



Ezio Baldovin, Gian Luca Morelli*

RESILIENZA SISMICA DI UNA DIGA IN ROCKFILL CON MANTO BITUMINOSO IN SICILIA**

SEISMIC RESILIENCE OF AN ASPHALT FACED ROCKFILL DAM (AFRD) IN SICILY

Nel presente articolo è documentato l'esempio della Vasca Ogliastro, progettata e costruita nel periodo 1965-1970 fuori alveo e contenuta da uno sbarramento perimetrale in rockfill con manto bituminoso.

La zona geografica in cui ricade l'opera, inizialmente non considerata sismica, fu interessata da un importante terremoto nel 1990 e la struttura raggiunse lo stato limite di danno.

Dopo una breve descrizione delle opere, vengono presentate le caratteristiche del sisma e le sue conseguenze sulle strutture, unitamente agli interventi di manutenzione straordinaria intrapresi.

Infine sono illustrati i risultati di un'analisi sismica aggiornata secondo le norme italiane attualmente in vigore, che confermano la resilienza sismica sperimentata della Vasca Ogliastro.

Parole Chiave: Conglomerato bituminoso, Fessurazione, Manutenzione, Riabilitazione, Diga in rockfill, Sismicità.

In the present paper the example of Ogliastro Reservoir, designed and built in the period 1965-1970 outside the riverbed and contained by an asphalt facing rockfill dam (AFRD) is documented. The geographic zone, initially not considered seismic, was interested by an important earthquake in 1990 and the structure reached the damage limit state.

After a short description of the works, the characteristics of the seism and its consequences on the structures are presented, associated with the undertaken extraordinary maintenance interventions.

Finally the results of an updated seismic analysis according to the Italian Rules presently in force are illustrated, confirming the experienced seismic resilience of Ogliastro Reservoir.

Keywords: Asphalt, Cracking, Maintenance, Rehabilitation, Rockfill Dam, Seismicity.

1. PREMESSA

Anche se l'Italia è stata periodicamente colpita da terremoti storici importanti, la consapevolezza progressiva del diffuso rischio sismico del territorio italiano è diventata evidente solo nell'ultima parte del secolo scorso, quando era già stato costruito un gran numero di dighe.

Le normative italiane hanno quindi subito una lunga serie di aggiornamenti per affrontare il problema secondo le crescenti conoscenze.

Nel frattempo in diverse regioni italiane sono state acquisite alcune esperienze su dighe soggette a terremoti, dando origine a specifiche case histories.

In particolare, lo stato limite di danno è stato raggiunto da due sbarramenti, la Diga di Acciano nell'Italia centrale e la Vasca Ogliastro nella Sicilia orientale, mentre la Diga di Piana degli Albanesi (a gravità in muratura), nella Sicilia occidentale, è arrivata al limite di salvaguardia della vita (Catalano et al., 2013).

Nel seguito è documentato l'esempio della Vasca Ogliastro, progettata e costruita nel periodo 1965-1970 al di fuori del letto del fiume e delimitata da uno sbarramento realizzato in rockfill con dispositivo di tenuta a manto bituminoso (AFRD). La zona geografica in cui ricade l'opera, inizialmente non considerata sismica, è stata interessata da un importante terremoto nel 1990.

Dopo una breve descrizione delle opere, vengono presentate le caratteristiche del sisma occorso e le sue conseguenze sulle strutture, associate agli interventi di manutenzione straordinaria conseguentemente intrapresi.

Dal momento che la zona geografica in esame è stata in seguito classificata come una delle aree a sismicità più

*E. Baldovin, Ingegnere; G. L. Morelli, Geologo - Geotecnica Progetti Srl - Milano.

** Il presente articolo è tratto da una memoria presentata al Congresso ICOLD di Vienna, Luglio 2018.

severa in Italia, infine sono illustrati i risultati di un'analisi sismica aggiornata, sviluppata secondo le norme italiane in vigore, che confermano la sicurezza dell'opera.

I quasi 50 anni di regolare esercizio della Vasca Ogliastro in un'area sottoposta a numerose rivalutazioni sismiche a crescente intensità dimostrano la validità delle soluzioni tecniche adottate.

2. CARATTERISTICHE DELLA VASCA OGLIASTRO

La Vasca Ogliastro è stata costruita tra il Dicembre 1968 e l'Ottobre 1970 per realizzare un invaso di 4.450.000 m³ (Fig. 1), finalizzato a soddisfare la domanda di acqua dell'impianto petrolchimico situato a Priolo, sulla costa Est della Sicilia, in provincia di Siracusa (Baldovin et al., 1973).

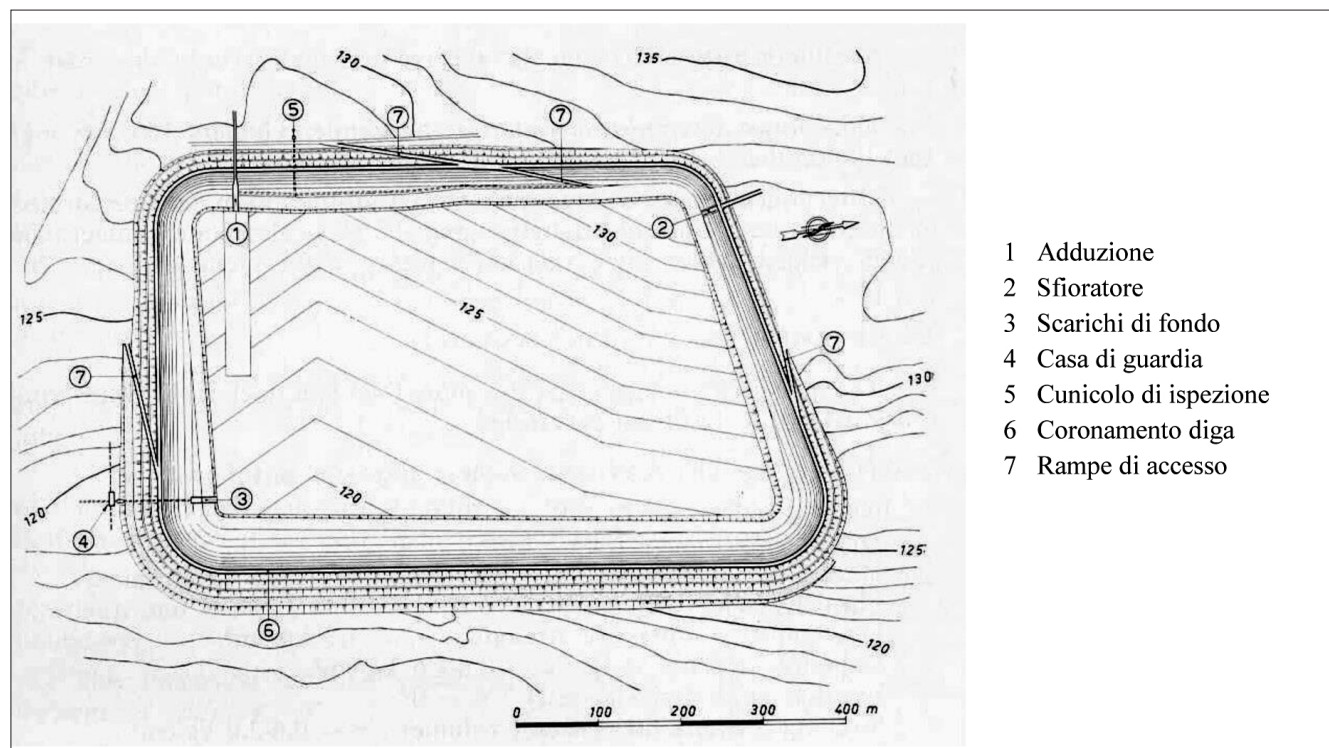


Figura 1 - Planimetria del serbatoio.

Essendo il bacino situato su di un altopiano non direttamente alimentato da un bacino imbrifero diretto, l'acqua è derivata da due dighe ubicate lungo i corsi dei vicini Rio Fiumara Grande e Rio Mulinello, con un bacino idrografico totale di 64,2 km².

L'invaso, con coronamento alla quota 140 m s. m., è delimitato da un argine perimetrale trapezoidale realizzato in rockfill calcarenitico, di lunghezza circa 2350 m ed altezza variabile tra 7,1 e 22,6 m. La quota del pelo libero può variare tra la 138,3 e la 122 m s.m..

La struttura di imbocco dell'adduzione in calcestruzzo armato è localizzata in corrispondenza dell'angolo Sud-Ovest della Vasca.

Lo scarico di fondo e la derivazione sono posizionati sul lato Sud e consistono in tubi in acciaio di diametro rispettivamente 1200 e 600 mm, posti all'interno di un cunicolo accessibile, in calcestruzzo armato, di dimensione 2,5 m x 2,5 m.

Lo scarico di superficie in calcestruzzo armato, controllato da una paratoia di 5,0 m x 3,0 m, con una portata massima di 44 m³/s, si trova sul lato Nord.

Attualmente il gestore dell'impianto è la Società Priolo Servizi S.C.p.A.

2.1 Criteri di progetto della diga

La stratigrafia originale dell'altopiano costituita, su tutta l'impronta del bacino, da un livello di calcarenite sovrastante le argille di base, garantiva la tenuta idraulica del fondo del serbatoio, ma, al tempo stesso, ha obbligato ad escludere l'adozione di qualsiasi tipo di diga rigida.

Dopo un accurato confronto tecnico ed economico si è quindi deciso di costruire uno sbarramento omogeneo di calcarenite con tenuta a monte, tipologia che è stata preferita a quella più generalmente utilizzata con nucleo centrale impermeabile in argilla.

Pendenza, altezza e dimensioni della diga sono state scelte sulla base delle condizioni geologiche della fondazione, nonché tenendo conto del miglior utilizzo possibile dei materiali provenienti dalle cave di prestito disponibili nelle vicinanze del sito.

2.2 Il corpo diga

La calcarenite disponibile ha mostrato un buon grado di lavorabilità ed è stata scavata nell'area di prestito mediante bulldozer.

La *Tabella I* riporta le caratteristiche geotecniche ottenute con prove di laboratorio.

TABELLA I - Caratteristiche geotecniche ottenute mediante prove di laboratorio sul materiale calcarenitico della diga

Peso di volume secco massimo, γ_d (da Proctor Standard)	Peso di volume secco massimo, γ_d (da Proctor Modificato)	Modulo elastico, E (da Proctor Standard)	Modulo elastico, E (da Proctor Modificato)	ϕ' (sul passante a 20 mm)	ϕ' (su frammenti di roccia di diametro 50÷80 mm)
t/m ³	t/m ³	Kg/cm ²	Kg/cm ²	°	°
2,0	2,1	250	400	35÷45	38

La sezione tipo dello sbarramento (*Fig. 2*) è costituita da:

- una zona centrale composta da blocchi di calcarenite fino a 0,4 m³ di volume, realizzata per strati di 80 cm di spessore, successivamente compattati con sei passate di rullo vibrante da 13 tonnellate. Il rullo frantumava i blocchi più deboli producendo frammenti che andavano a riempire gli spazi vuoti lasciati tra i blocchi più grandi e più resistenti, consentendo il raggiungimento di una densità secca del materiale compattato pari a 1,9 t/m³ e permeabilità di 10⁻⁵ m/s;
- un rinfiando di monte, di circa 2 m di spessore, di calcarenite, realizzato per strati di 40 cm compattati con un rullo vibrante da 13 t. La densità e la permeabilità finale a secco sono risultati in media di 1,95 t/m³ e 10⁻⁶ m/s, rispettivamente. Alla fine della compattazione la superficie dello strato è stata livellata per ottenere una base regolare per l'appoggio del manto bituminoso;
- un rinfiando di valle, di 2 m di spessore, costituito da calcarenite grossolana con poca o nulla frazione di sabbia e parti fini.

Il paramento di valle è stato rivestito con uno strato di terreno vegetale inerbito.

Le curve che collegano i quattro lati del serbatoio sono piuttosto ampie, per facilitare le operazioni di costruzione del manto a monte.

Un sistema di drenaggio, formato da cunicoli e tubi forati del diametro di 400 mm, è stato introdotto tutto intorno al serbatoio, immediatamente a valle del diaframma, per raccogliere l'acqua eventualmente percolante attraverso la membrana bituminosa.

Lo scarico verso l'esterno dei tubi di drenaggio perimetrali avviene attraverso vari tubi trasversali di diametro 400 mm, dotati di dispositivi di misurazione del flusso il cui controllo consente di localizzare tempestivamente eventuali zone di perdita.

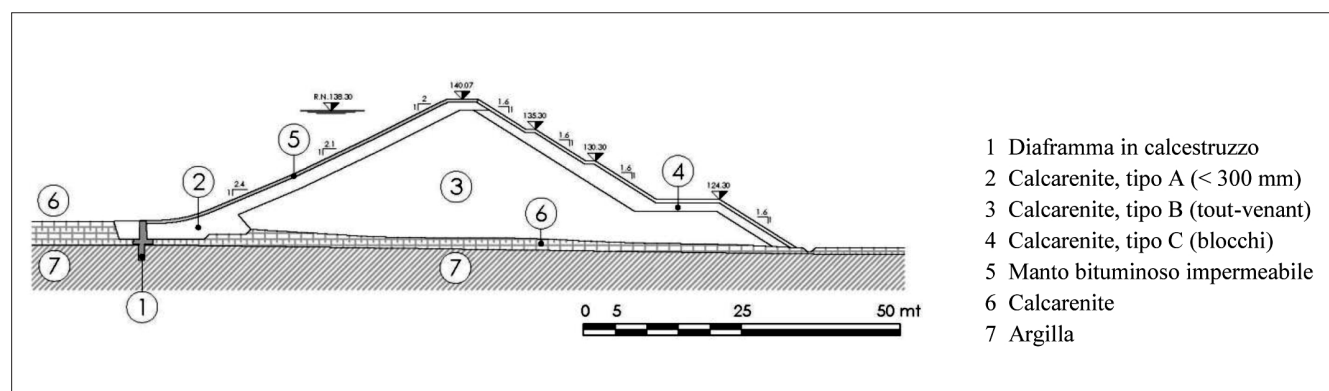


Figura 2 - Sezione trasversale.

2.3 Il manto bituminoso impermeabile

Il conglomerato bituminoso impermeabile è stato posato direttamente sul paramento di monte, previamente compattato al fine di ottenere una base regolare (rugosità massima consentita 4 cm su 3 m di distanza) e trattato spruzzando una soluzione acquosa al 10% di cloruro di sodio nella quantità di 1 l/m², per prevenire l'eventuale crescita di piante.

Il manto è formato dai seguenti strati:

- strato di conglomerato bituminoso drenante, di spessore 8 cm, composto da aggregati calcarei con dimensione massima dei grani pari a 35 mm; percentuale di bitume = 3 ÷ 4% del peso totale; permeabilità $K = 10^{-4}$ m/s; temperatura di messa in opera = 140 °C;
- binder bituminoso, con spessore 3 cm, composto da aggregati calcarei di dimensioni massime 18 mm; percentuale di bitume = 6 ÷ 7% del peso totale; permeabilità 10^{-6} ÷ 10^{-7} m/s; temperatura di messa in opera = 140°;
- strato di conglomerato bituminoso impermeabile, di spessore 6 cm, composto da aggregati calcarei e basaltici con dimensione massima dei grani fino a 18 mm; percentuale di bitume = 8,5-9,5% del peso totale; permeabilità $K = 10^{-9}$ ÷ 10^{-10} m/s; temperatura di messa in opera = 180 °C;
- sigillo bituminoso (2 kg/m²) formato da bitume, filler calcareo, calcestruzzo, amianto e sabbia, rispettivamente nelle seguenti percentuali: 41-17-28-5 e 9 %; temperatura di messa in opera 210 °C.

Il conglomerato è stato ottenuto usando bitume relativamente duro (B40/50), a causa delle alte temperature a cui è esposto il manto in esercizio (latitudine circa 37°).

Sono state prese delle precauzioni per evitare eventuali processi di rammollimento spruzzando la superficie esposta del manto con 1 l per 10 m² di soluzione di calce vinilica al 10%.

L'impermeabilizzazione completa lungo i giunti di posa in opera è stata ottenuta mediante riscaldamento a raggi infrarossi e compattazione con vibratore per una fascia larga 40 cm. Detto trattamento ha fornito al manto una perfetta continuità. Gli aggregati con dimensioni superiori a 2 mm sono stati selezionati di natura basaltica per la minore e più costante porosità; gli aggregati di calcare sono stati, invece, utilizzati per le dimensioni più piccole.

3. IL TERREMOTO DI SANTA LUCIA

Dal Dicembre 1990 al Gennaio 1991, una sequenza sismica culminata in un grave terremoto ($M_w = 5,61 \pm 0,1$ dal database CPTI15) avvenuto il 13 Dicembre 1990 (terremoto di S. Lucia), ha provocato fortissimi scuotimenti in molti comuni della Sicilia orientale, determinando 17 morti, centinaia di feriti, migliaia di senzatetto e gravi danni in tutta la zona. L'ipocentro del terremoto di S. Lucia fu stimato a profondità di circa 10 km con epicentro situato nel Mar Ionio, a poca distanza dalla città di Augusta (Fig. 3/a), a circa 27 Km dal sito della Vasca Ogliastro.

L'origine geologica del terremoto è stata collegata ai movimenti avvenuti lungo un sistema di strutture tettoniche sepolte, orientate NO-SE e NNO-SSE, direttamente collegate al recente sviluppo della Scarpata di Malta, una faglia litosferica distensiva che separa l'Altopiano Ibleo (Hyblean Plateau) continentale dal bacino oceanico Mesozoico Ionico (Fig. 3/a).

Nella Sicilia orientale alcune

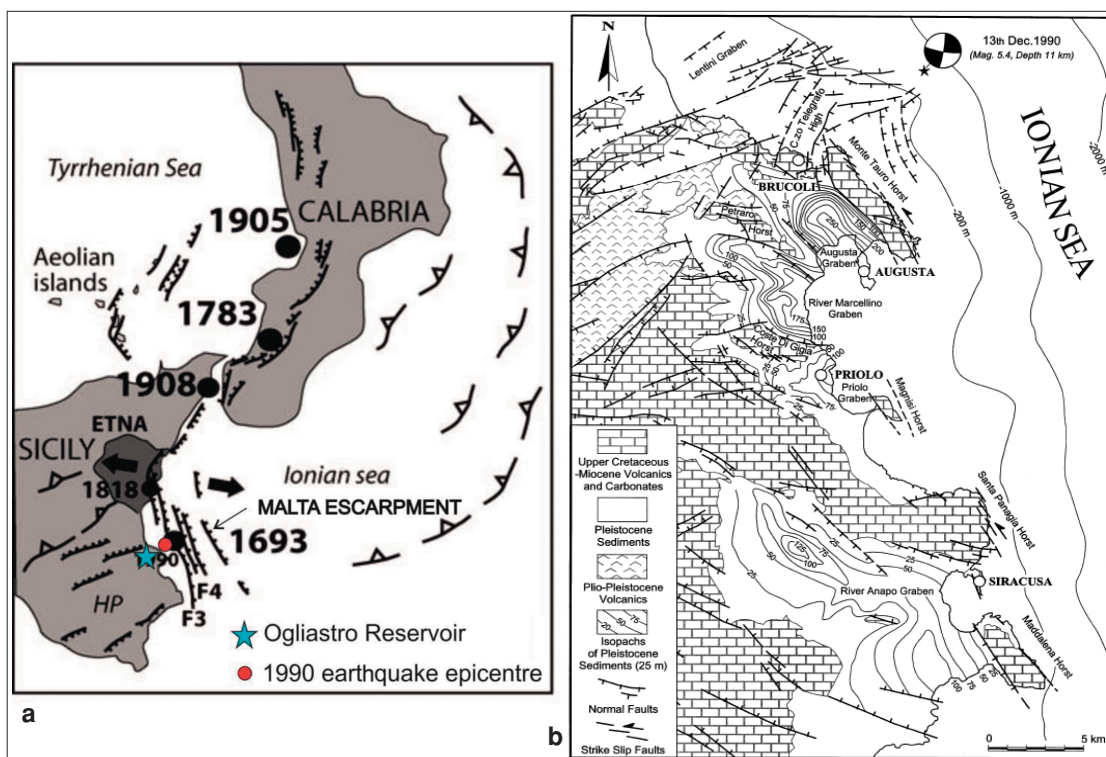


Figura 3 - Principali epicentri dei terremoti storici occorsi nella Sicilia orientale (a) da Feuillet et al. (2006) modificato, (b) da Adam et al. (2000). I simboli a stella indicano la posizione del sito Ogliastro.

di queste faglie off-shore si estendono anche sulla terraferma, dando vita ad una serie di strutture a horst e graben bene individuabili tra le città di Catania e Siracusa (Fig. 3/b).

Le principali caratteristiche stimate per il terremoto di S. Lucia al sito di Ogliastro sono state riportate da Catalano et al. 2013:

- $I_{MCS} = 6,5$
- $PGA = 0,241 g$
- $PGV = 0,039 m/s$.

4. LE CONSEGUENZE SULLA VASCA DI OGLIASTRO

Le condizioni dei principali manufatti, nonché i risultati delle indagini e le misure di controllo effettuate sulle opere immediatamente dopo l'evento sismico, sono riassunti di seguito.

Il livello del bacino idrico al momento del sisma era di ~ 132 m s.m., ovvero più di 6 m sotto il livello della massima regolazione. In tale condizione il lato Ovest della Vasca era quasi completamente esposto. Spostamenti macroscopici planimetrici o altimetrici non sono stati osservati né lungo la strada di coronamento, sui quattro lati, né sul paramento esterno (di valle) e sulla parte emergente di quello interno (di monte). Inoltre, sul paramento esterno

non sono state rilevate perdite d'acqua o indizi di umidità. L'unico elemento strutturale che è stato interessato principalmente dalle conseguenze dell'evento è stato il manto bituminoso che impermeabilizza il paramento interno del serbatoio. In effetti esso è risultato interessato da alcune fessure (Fig. 4), per lo più osservate lungo le curve dello sbarramento ed in prossimità delle opere ausiliarie in calcestruzzo armato (adduzione e scarico di superficie), o vicino alle discontinuità. Una piccola parte di esse, isolata, è stata osservata nella zona centrale dei lati Ovest e Nord.

Le fessure presentavano ben definite caratteristiche di continuità (dal coronamento al livello dell'acqua e talvolta fino al piede dello sbarramento, accanto al diaframma), orientamento (quasi tutte diagonali) ed apertura (uguale o inferiore a 1 mm). Un altro elemento ricorrente osservato, che confermerebbe un meccanismo di rottura per tensioni di trazione, è l'assenza di spostamenti differenziali tra i bordi delle fessure in direzione perpendicolare alla superficie del paramento. Alcune di esse continuavano sulla pavimentazione stradale del coronamento, attraversandola su tutta la larghezza, e comunque sparivano sul paramento esterno. L'estremità del manto bituminoso impermeabile a contatto con il diaframma è stata ispezionata sul lato Ovest e negli angoli Nord-Ovest e Sud-Ovest della Vasca, dove emergeva. Ivi non sono stati rilevati sollevamenti o tagli, anche laddove sono comparse le fessure.

Per verificare la profondità raggiunta da queste ultime, sono stati carotati dal paramento alcuni campioni in corrispondenza delle stesse.

Dall'esame dei fori di carotaggio e delle carote estratte (Fig.5), si è visto chiaramente che le rotture hanno interessato l'intero spessore del manto.

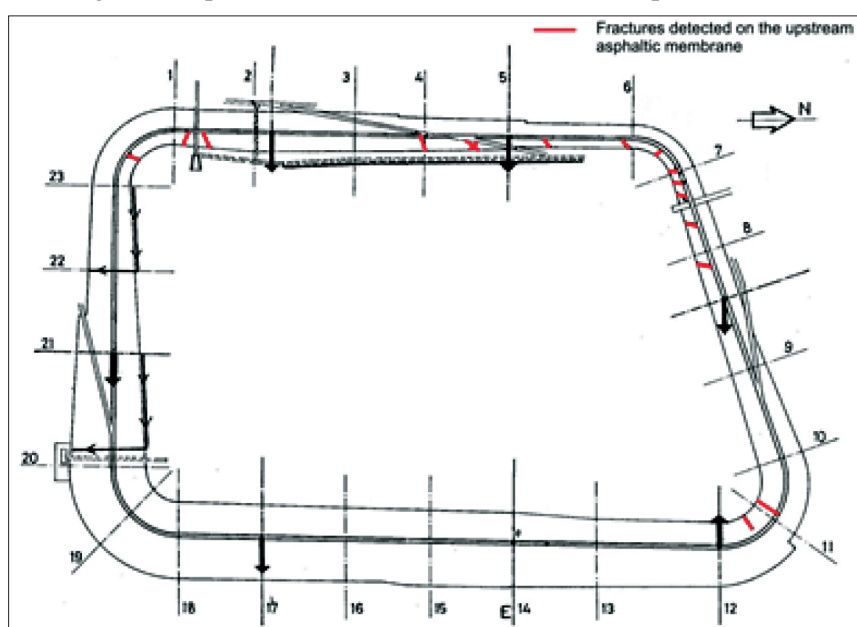


Figura 4 - Ubicazione delle principali fessure rilevate nel manto bituminoso dopo il terremoto di S. Lucia.



Figura 5 - Caratteristiche delle fessure del manto impermeabile osservate sulle carote.

Le perdite dai drenaggi sono aumentate leggermente per effetto della fessurazione del manto, rimanendo, tuttavia, al di sotto di 1 l/s, valore che è stato considerato comunque accettabile.

In ogni caso bisogna sottolineare che il livello del bacino idrico al momento del terremoto era basso e che è stato mantenuto costante nel periodo successivo.

L'ispezione delle strutture dell'adduzione e dello scarico di superficie ed i risultati delle relative misure clinometriche non hanno rilevato perdite di verticalità, deformazioni inattese o danni, ad eccezione di un piccolo distacco di calcestruzzo su un lato del contrappeso della paratoia dello scarico di superficie, probabilmente dovuto al suo impatto sulle pile durante il terremoto. La sua piena operatività è stata comunque verificata positivamente.

Nessuna particolare anomalia è stata osservata anche nei cunicoli centrale e lato Ovest ed in quello dello scarico di fondo.

5. INTERVENTI DI MANUTENZIONE STRAORDINARIA

Il tipo di fessure rilevate e la loro notevole diffusione sul paramento impermeabilizzato con conglomerato bituminoso, associati all'urgenza di tornare al normale funzionamento del bacino, hanno indirizzato la ricerca verso una soluzione tecnica mirata alla rapida riparazione delle fessure.

Valutate diverse alternative possibili, nel Febbraio 1991, nella parte di paramento esposto sopra il livello dell'acqua del serbatoio, per una fascia di larghezza di 50 cm è stata eseguita una fresatura graduata dell'intero spessore dello strato impermeabile (circa 6 cm) a cavallo delle fessure e si è operato il ripristino del conglomerato bituminoso, con ridotta granulometria degli aggregati.

Il successivo riempimento del serbatoio è stato caratterizzato da un aumento immediato, fino a 4,5 l/s, delle perdite totali misurate agli scarichi dei drenaggi, probabilmente da attribuire ad un fenomeno di iniziale assestamento dello sbarramento.

Successivamente la portata ha raggiunto un valore costante intorno a 2÷3 l/s, paragonabile a quello precedente il terremoto.

In ogni caso, al fine di garantire l'impermeabilità del paramento interno anche a lungo termine, nel 1993 Geotecnica Progetti è stata incaricata di redigere un progetto di rigenerazione del manto bituminoso sui lati Ovest, ed in parte sui lati Nord e Sud, senza svuotare totalmente il serbatoio, al fine di preservare un volume d'acqua di emergenza.

Il Concessionario ha proceduto con l'intervento durante l'estate del 1993 (Fig. 6).

Quest'ultimo è consistito nella fresatura parziale dell'esistente manto bituminoso superficiale per uno spessore di 3 cm (6 cm in corrispondenza delle fessure) e nella realizzazione di un nuovo strato impermeabile, dello spessore di 8 cm, realizzato con bitume modificato con elastomeri termoplastici, nonché nell'applicazione di un nuovo sigillo su una superficie totale di circa 30000 m².

Nello stesso tempo tutti i giunti di costruzione sono stati rinnovati nelle zone trattate.

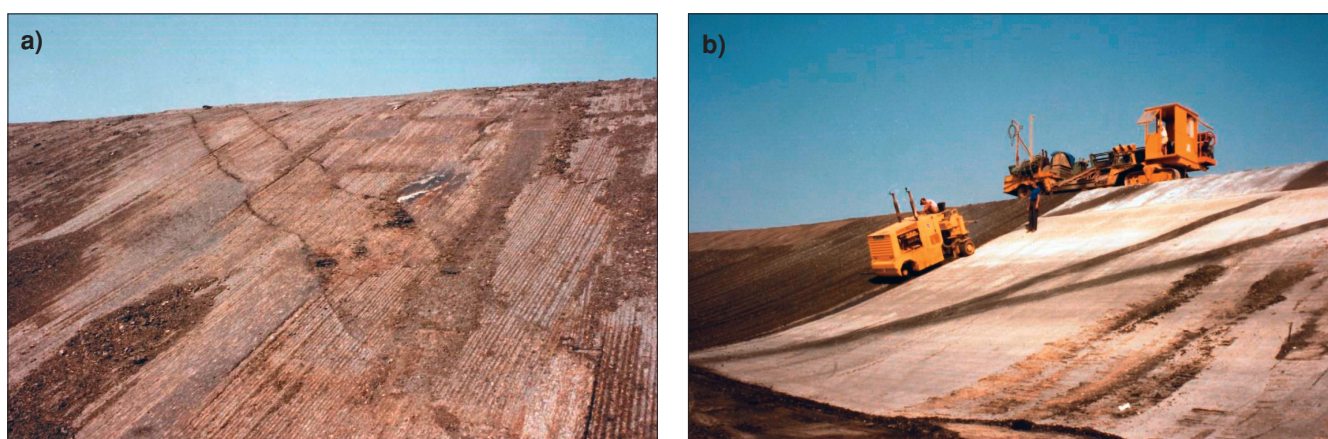


Figura 6 - a) Paramento interno fresato con evidenza in pianta delle fasce soggette precedentemente a trattamenti urgenti in corrispondenza delle fessure. b) Messa in opera del nuovo strato realizzato con bitume modificato.

6. RIVALUTAZIONE ED ANALISI SISMICA DELLA VASCA OGLIASTRO

A seguito del processo di rivalutazione del rischio sismico di tutto il territorio italiano, l'area in cui si trova la Vasca Ogliastro è diventata negli ultimi anni di particolare interesse per la Direzione Nazionale Dighe, a causa dell'aumentato livello atteso dei possibili terremoti.

Di conseguenza, un'analisi sismica è stata recentemente sviluppata per la Vasca Ogliastro in conformità alle vigenti norme italiane NTD14 (D.M. 2014) e NTC08 (D.M. 2008), basata sugli stati limite.

Nell'ambito di questa verifica, uno studio sismotettonico specifico per il sito di Ogliastro è stato eseguito in accordo con le NTD14 (D.M. 2014), risultando per un periodo di ritorno di 475 anni l'accelerazione orizzontale massima prevista al sito, normalizzata rispetto all'accelerazione di gravità (a_g/g), maggiore di 0,15.

Lo studio sismotettonico mirava principalmente a:

- valutare il potenziale sismico (magnitudo massima attesa, parametri di rottura, distanza dal sito) associato a sorgenti sismogenetiche regionali rilevanti (valutazione deterministica);
- identificare la presenza in superficie di strutture tettoniche attive nell'intorno del sito.

Le conclusioni principali dello studio sono state le seguenti:

- i valori fissati dal NTC08 (D.M. 2008) per i picchi di accelerazione orizzontale e verticale sono risultati superiori alle stime deterministiche e gli spettri orizzontali e verticali dati dalle NTC08 (D.M. 2008) sono sostanzialmente confermati dall'involuppo degli spettri deterministici;
- non sono evidenti strutture tettoniche attive nell'intorno del sito, anche se sarebbe necessaria una ricerca locale più dettagliata per escludere definitivamente la loro presenza.

La definizione del carico sismico e l'analisi sismica secondo NTD14 (D.M. 2015) e NTC08 (D.M. 2008) sono presentate nei paragrafi seguenti.

6.1 Definizione del carico sismico

Per la individuazione delle azioni sismiche agenti su una diga esistente, come la Vasca Ogliastro, il regolamento italiano, di cui alle NTD14 (D.M. 2014), ipotizza una vita nominale V_N di 50 anni, che, combinata con un coefficiente di utilizzo C_U di 1,5 (essendo l'uso industriale "rilevante", ma non "strategico"), diventa $V_R = 75$ anni e fornisce, per i periodi di ritorno da considerare in ogni stato limite, i valori riportati in *Tabella II*.

TABELLA II - Periodi di ritorno delle azioni sismiche per gli stati limite

Stato Limite di	Operatività (SLO)	Danno (SLD)	Salvaguardia della vita (SLV)	Collasso (SLC)
$P_{VR}(\%)$	81	63	10	5
$T_R(\text{anni})$	45	75	710	1460

L'azione sismica da applicare alla struttura viene estratta da un data base, allegato alle NTC08 (D.M. 2008), in funzione della longitudine (15.12988°) e della latitudine (37.24059°) del sito ed è definita dai seguenti parametri caratteristici, a seconda dello stato limite considerato:

T_R = periodo di ritorno;

a_g = massima accelerazione orizzontale al sito;

F_0 = massimo valore del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;

T_C^* = periodo iniziale della parte a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Per il caso in esame, i valori di tali parametri sono riassunti nella seguente *Tabella III*.

TABELLA III - Parametri delle azioni sismiche

Stato Limite di	T_R [anni]	A_g [g]	F_0 [-]	T_C^* [s]
Operatività (SLO)	45	0.061	2.486	0.267
Danno (SLD)	75	0.083	2.487	0.286
Salvaguardia della vita (SLV)	712	0.315	2.313	0.448
Collasso (SLC)	1462	0.449	2.344	0.503

6.2 Analisi sismica

In caso di dighe esistenti, le NTD14 (D.M. 2014) richiedono di prendere in considerazione alcuni stati limite.

In particolare per gli sbarramenti in materiali sciolti allo stato limite di collasso (SLC) devono essere considerate le seguenti situazioni:

1. instabilità dei paramenti e/o dei terreni di fondazione e deformazioni del corpo della diga e/o dei terreni di fondazione, in grado di determinare danni strutturali all'argine o la tracimazione dello stesso;
2. collasso dello sbarramento per erosione interna o piping;
3. rottura del manto bituminoso;
4. liquefazione del corpo della diga o dei terreni di fondazione;
5. rottura o danneggiamento degli scarichi che bloccano lo svaso controllato del serbatoio.

Nei paragrafi successivi i risultati ottenuti per ciascuna condizione menzionata dalle NTD14 (D.M. 2014) vengono illustrati e discussi.

L'analisi ha confermato la sperimentata resilienza sismica della Vasca Ogliastro.

6.2.1 Instabilità e deformazioni dello sbarramento e delle fondazioni

In particolare, attraverso l'analisi dinamica della sezione di massima altezza interessata dal sisma associato allo stato limite di collasso, sono state esaminate l'eventuale instabilità dei paramenti e/o dei terreni di fondazione e le deformazioni del corpo della diga e/o dei terreni di fondazione che possono determinare danni strutturali all'argine o la sua tracimazione.

Allo scopo, estratte dal data base allegato alle NTC08 (D.M. 2008) le azioni sismiche (v. *Tab. III*), sono stati selezionati sette accelerogrammi di riferimento da utilizzare nei calcoli di verifica (*Fig. 7*).

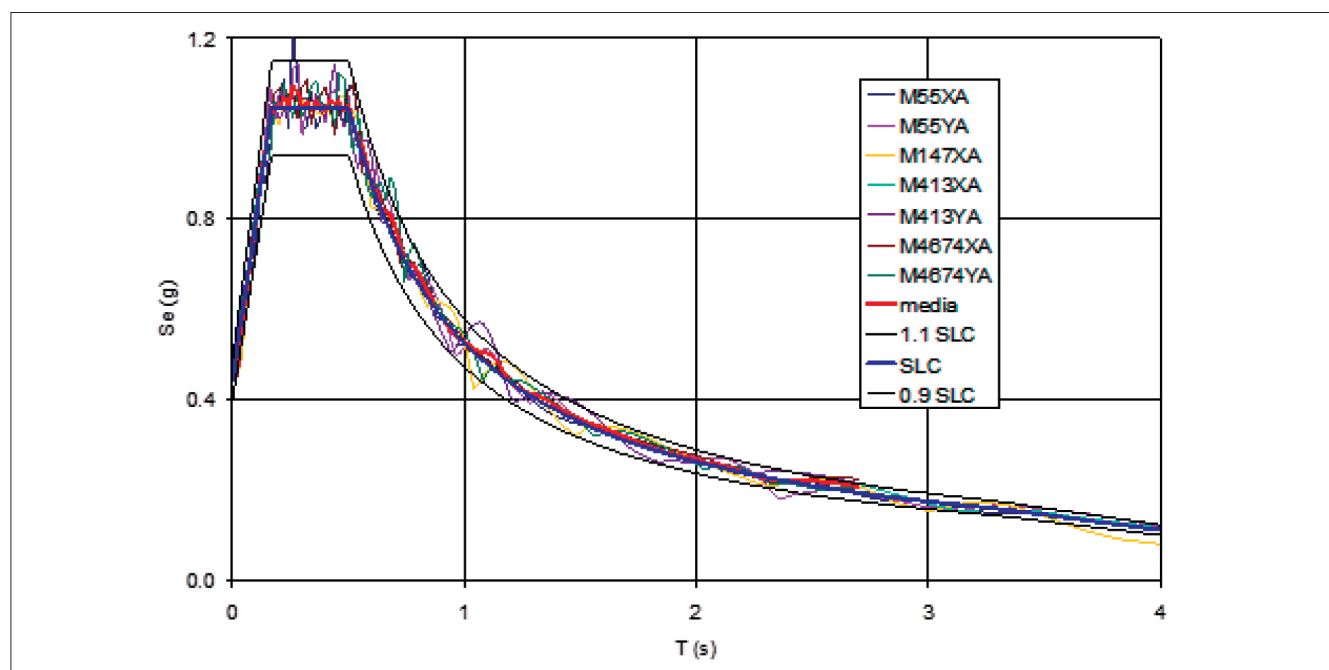


Figura 7 - Spettro SLC e spettri degli accelerogrammi normalizzati.

Le caratteristiche geotecniche dinamiche del corpo dello sbarramento e dei terreni di fondazione sono state definite sulla base di formulazioni di letteratura, confrontate con i risultati di recenti stendimenti MASW e di indagini pregresse.

L'analisi dinamica è stata sviluppata utilizzando sia un modello lineare equivalente (codice di calcolo FLUSH), che una legge costitutiva di tipo non lineare (FLAC).

Le deformazioni permanenti sono state valutate utilizzando correlazioni empiriche, con l'integrazione numerica diretta dei risultati dell'analisi dinamica lineare equivalente e con l'approccio non lineare.

Anche in caso di un sisma SLC i risultati ottenuti confermano la sicurezza dello sbarramento per quanto riguarda una possibile perdita incontrollata dell'acqua. Infatti il rischio di tracimazione per annullamento del franco è scongiurato e l'analisi numerica mette in evidenza che non si verificano fenomeni di instabilità coinvolgenti i paramenti, in particolare quello di monte, e che a valle gli spostamenti permanenti sono concentrati in una zona corticale.

Gli spostamenti residui calcolati con l'integrazione numerica dell'analisi dinamica lineare equivalente sono compresi tra 0,5 e 0,85 metri. Tali valori concordano bene con quelli stimati attraverso correlazioni empiriche di letteratura e che al più raggiungono circa 0,9 m.

In particolare l'analisi non lineare ha fornito uno spostamento assoluto di 1,18 m (componente verticale 0,65 m, a valle).

Data la rilevanza del sisma, il rapporto tra il massimo cedimento ed il franco disponibile (1,70 m) può essere considerato accettabile.

6.2.2. Collasso per erosione interna

Lo sviluppo dell'erosione interna in una diga in materiali calcarenitici con manto bituminoso impermeabile sul paramento di monte potrebbe avvenire in conseguenza di una rottura generalizzata del manto e richiederebbe una particolare erodibilità del materiale attraversato dall'acqua di infiltrazione.

In particolare per la Vasca Ogliastro, l'analisi di filtrazione e la verifica del rischio di erosione interna, effettuate nell'ipotesi di una rottura generalizzata del manto bituminoso impermeabile, forniscono risultati soddisfacenti per quanto riguarda la stabilità dello sbarramento.

La zonatura interna dello sbarramento è rappresentata nella sezione trasversale illustrata in *Figura 2*; lo strato drenante in conglomerato bituminoso, posto al di sotto del manto bituminoso impermeabile, ed i blocchi calcarenitici che proteggono il paramento di valle, rivestono un'importanza rilevante per la sua funzionalità nel caso ipotetico di rottura del rivestimento impermeabile.

Infatti lo strato drenante previene e rallenta la saturazione del corpo della diga ad opera dell'eventuale acqua di filtrazione; i blocchi calcarenitici, oltre a migliorare la stabilità del paramento di valle, tendono a contrastare l'insorgenza delle perdite sullo stesso paramento, nel caso in cui il sistema di drenaggio a monte non riesca ad intercettare tutte le filtrazioni.

Per garantire l'integrità dello sbarramento anche nel caso ipotetico della rottura del manto bituminoso, è stata verificata la stabilità della calcarenite rispetto all'erosione interna.

Il criterio di "autoprotezione", solitamente adottato per i filtri, è stato applicato con successo ad una composizione granulometrica media, in cui le frazioni più grossolane sono state considerate come materiale di base e quelle più fini come filtro.

Allo stesso tempo lo sbarramento in calcarenite può esercitare la funzione di barriera idraulica provvisoria dell'invaso.

Infatti utilizzando un coefficiente di permeabilità medio $k = 10^{-5}$ m/s, la portata di filtrazione in un singolo settore di 100 m compreso tra i tubi che convogliano all'esterno le acque di drenaggio sarebbe di circa 2,8 l/s.

Il tempo transitorio necessario per raggiungere una condizione stazionaria di saturazione caratterizzata da tali portate può essere stimato in circa 1-2 mesi, a partire dall'inizio della filtrazione causata dalla rottura generalizzata del manto bituminoso.

6.2.3. Fessurazione del manto bituminoso

La fessurazione del manto bituminoso, che di solito è limitata ad alcune lesioni, è difficilmente prevedibile con metodi numerici, data anche la particolare forma trapezoidale della Vasca Ogliastro.

In ogni caso, si può presumere che un tale evento implicherebbe l'immediato coinvolgimento del sistema di drenaggio, così come il graduale sviluppo di una filtrazione all'interno del rilevato della diga.

Oltre alla rapidità nel rilevamento della rottura, al fine di gestire una possibile operazione di svuotamento, la permeabilità e la capacità di autoprotezione del materiale dello sbarramento, che sono già state analizzate nel paragrafo precedente, risultano molto importanti per affrontare il possibile stato limite.

Il sistema di drenaggio è stato effettivamente dimensionato per evacuare l'acqua di filtrazione in assenza del manto bituminoso impermeabile sul paramento di monte.

La portata di filtrazione è convogliata attraverso lo strato aperto di conglomerato bituminoso situato a valle dello strato di tenuta.

Questo strato permeabile ha uno spessore di 8 cm ed un coefficiente di permeabilità di circa 10^{-4} m/s, superiore alla zona immediatamente sottostante, composta da uno spessore di 2 m di calcarenite con granulometria <300 mm e permeabilità inferiore di almeno un ordine di grandezza.

L'acqua di filtrazione, diretta verso il piede interno dello sbarramento, è raccolta da un tubo di drenaggio di diametro 400 mm, situato immediatamente a valle del taglione in calcestruzzo, sotto il paramento, e che si estende lungo tutto il perimetro interno.

Ad intervalli di 100 m il tubo di drenaggio è interrotto da pozzetti, da cui una tubazione trasversale convoglia l'acqua raccolta all'esterno, dove viene misurata.

Qualsiasi rottura del rivestimento impermeabile è perciò segnalata da un insolito flusso d'acqua.

Poiché la differenza di coefficiente di permeabilità tra lo strato drenante e lo strato di calcarenite sottostante non è grande, nel caso in cui la filtrazione si sviluppi verso il tubo di scarico situato al piede interno, essa inizia, pur se con entità inferiore, anche verso il corpo centrale dello sbarramento.

6.2.4 Stabilità dei paramenti dello sbarramento

L'eventuale fessurazione del manto bituminoso impermeabile e la formazione di zone saturate progressivamente

più ampie potrebbero determinare una marcata influenza negativa sulla stabilità dei paramenti dello sbarramento, a causa della formazione di pressioni neutre.

Pertanto le analisi di stabilità sono state effettuate sulle sezioni di massima altezza assumendo le condizioni più pessimistiche, cioè la rottura integrale dello strato impermeabile e lo sviluppo di un movimento di filtrazione stazionaria nel corpo della diga.

Per quanto riguarda il paramento di monte, nella condizione di serbatoio pieno le analisi hanno fornito elevati fattori di sicurezza.

Questi ultimi diventano minori con riferimento al paramento di valle, molto più ripido, anche se si ottengono comunque valori superiori a 1.2.

6.2.5 Potenziale di liquefazione del corpo diga e dei terreni di fondazione

Per la Vasca Ogliastro non è necessaria un'analisi del potenziale di liquefazione del terreno di fondazione dello sbarramento, poiché esso risulta costituito prevalentemente da argille-limose di età pleistocenica, probabilmente sovraconsolidate e caratterizzate da elevata plasticità ($IP \approx 50-60\%$) e valori di coesione non drenata superiori a 1 kg/cm^2 .

Nel sottosuolo di fondazione, questi depositi argillosi si alternano a strati biocalcarenitici spessi alcuni metri, con consistenza rocciosa e quindi certamente non vulnerabili a fenomeni di liquefazione.

Per i materiali granulari dello sbarramento, prodotti da frantumazione delle bancate calcarenitiche presenti nelle aree vicine al serbatoio e che non si prevede siano saturati a causa della presenza del manto bituminoso impermeabile sul paramento di monte, le caratteristiche granulometriche generali garantiscono la stabilità nei confronti dei fenomeni di liquefazione (Fig. 8), nonostante l'elevata sismicità del sito.

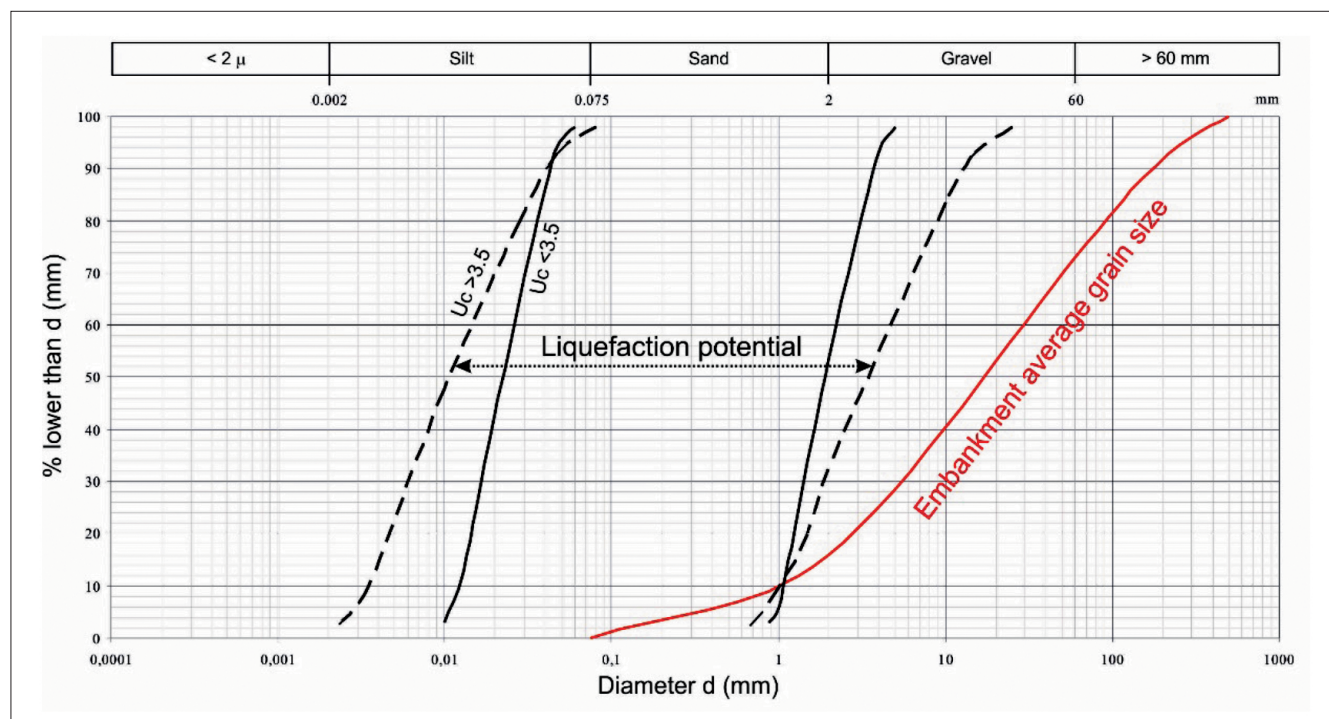


Figura 8 - Confronto tra i fusi granulometrici critici per la liquefazione, indicati dalle NTC08 (D.M. 2008) e la curva granulometrica media del materiale costituente il corpo diga.

Infatti, la curva granulometrica media della calcarenite che forma l'argine, corrispondente ad una ghiaia sabbiosa con ciottoli con coefficiente di uniformità $UC (D_{60}/D_{10})$ pari a 30 (indicativo di un materiale molto ben graduato), ricade sostanzialmente al di fuori del fuso critico indicato dalle NTC08 (D.M. 2008) per i materiali suscettibili di liquefazione.

Inoltre le velocità delle onde sismiche di taglio (V_s) attribuibili ai materiali del rilevato sulla base di prove MA-SW sono risultate piuttosto elevate, con valori prossimi a 300 m/s già a partire dalla superficie ed in aumento con la profondità, raggiungendo valori superiori a 650 m/s alla base dello sbarramento.

Queste velocità sono indubbiamente indicative di uno stato di elevata densità del materiale, elemento che, in aggiunta alle caratteristiche granulometriche sopra descritte, supporta un giudizio favorevole nei confronti della stabilità rispetto a potenziali fenomeni di liquefazione.

6.2.6 Rottura o danneggiamento dello scarico di superficie, di fondo e della derivazione

Come mostrato in *Figura 1*, la Vasca Ogliastro è dotata di una struttura di adduzione, di uno scarico di superficie e di uno scarico di fondo.

In ogni caso è possibile interrompere il flusso d'acqua in entrata agendo sulle paratoie, localmente, da remoto tramite telecontrollo o manualmente.

Il controllo del livello del serbatoio e le operazioni di svuotamento vengono eseguiti tramite i seguenti dispositivi:

- lo scarico di superficie, che è dotato di una paratoia a ventola con regolazione automatica e manuale;
- lo scarico di fondo e l'opera di adduzione, che sono intercettate da due elettrovalvole DN1200 e DN600, il cui funzionamento può essere controllato localmente, tramite il sistema di controllo remoto o manualmente.

Lo scarico di superficie, di fondo e la derivazione sono stati verificati con successo utilizzando le stesse azioni sismiche adottate per l'analisi dello sbarramento.

7. CONCLUSIONI

La consapevolezza progressiva del diffuso rischio sismico del territorio italiano è diventata evidente solo nell'ultima parte del secolo scorso, quando era già stato costruito un gran numero di dighe.

Il presente articolo documenta l'esempio della Vasca Ogliastro, progettata e costruita nel periodo 1965-1970 al di fuori del letto del fiume e delimitata da uno sbarramento realizzato in rockfill con dispositivo di tenuta a manto bituminoso (AFRD).

La zona geografica in cui ricade l'opera, all'epoca della costruzione non considerata sismica, è stata interessata dall'importante terremoto di Santa Lucia nel 1990 ($M_w = 5,61 \pm 0,1$ dal database CPTI15); in tale circostanza l'opera ha raggiunto lo stato limite di danno (*Catalano et al.*, 2013).

Effettuati i controlli regolamentari, l'esercizio del serbatoio è comunque ripreso regolarmente a seguito di contenuti interventi di manutenzione straordinaria sul manto bituminoso.

Essendo poi nel 2008 l'area in esame stata classificata come una delle zone a sismicità più severa in Italia, è stata effettuata un'analisi sismica aggiornata, sviluppata secondo le norme italiane in vigore, i cui risultati hanno confermato la sicurezza dell'opera.

Questa particolarità ed i quasi 50 anni di regolare funzionamento della Vasca Ogliastro, anche a fronte di rilevanti terremoti, dimostrano la validità delle soluzioni tecniche adottate e la resilienza sismica di tale tipologia di diga.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Adam J., Reuther C.D., Grasso M. & Torelli L., 2000. *Active fault kinematics and crustal stresses along the Ionian margin of south eastern Sicily*, Tectonophysics, 326, 217-239.

Baldovin G., Ghirardini A., 1973. *Ogliastro Reservoir peripheral dam, with 90,000 m² upstream bituminous membrane*, Proceedings 11th ICOLD Congress - Madrid.

Catalano A., Caruana R., Del Gizzi F., De Sortis A., 2013. *Observed behaviour of Italian dams under historical earthquakes*, Proceedings 9th ICOLD European Club Symposium - Venezia.

D.M. 14 gennaio 2008. *Norme tecniche per le costruzioni (in breve NTC08)*.

D.M. 26 giugno 2014. *Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)* (in breve NTD14).

Feuillet N., Cocco M., Musumeci C., Nostro C., 2006. *Stress interaction between seismic and volcanic activity at Mt Etna*. Geophys. J. Int. 164, 697-718.



Foto panoramica.

NOTIZIARIO A.I.I.

ASSOCIAZIONE IDROTECNICA ITALIANA

Via di Santa Teresa, 23 - 00198 Roma - Tel. 06.8845064 - E-mail: segreteria@idrotecnicaitaliana.it

Presidente onorario

Ugo Majone

Presidente

Armando Brath

Vice Presidenti

Beatrice Majone

Andrea Mangano

Segretario generale

Roberto Zocchi

Consiglieri

Salvatore Alecci, Gennaro Bianco, Vincenzo Bixio, Francesco Bosco, Giancarlo Chiaia, Cornelia Cocos, Carlo Collivignarelli, Vito Antonio Copertino, Giovanni de Marinis, Renato Drusiani, Mario Fossati, Giuseppe Frega, Andrea Gambi, Massimo Gargano, Giuseppe Giordano, Maurizio Giugni, Ruggiero Jappelli, Giorgio Martino, Anna Maria Martuccelli, Catello Masullo, Mario Rosario Mazzola, Carlo Messina, Maria Gerarda Mocella, Nicola Montaldo, Rossella Monti, Michele Mossa, Francesco Napolitano, Matteo Nicolini, Patrizia Piro, Giovanni Ruggeri.

Soci sostenitori

PLATINUM



GOLD



SILVER

