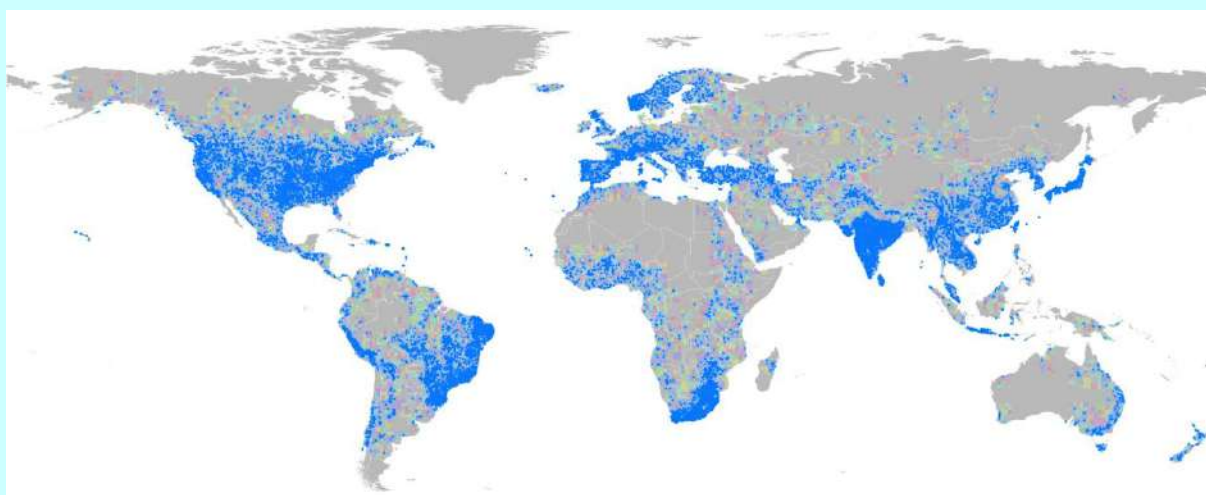


ITCOLD

Comitato Nazionale Italiano delle Grandi Dighe

Comportamento sismico delle dighe in materiali sciolti: Case histories in altri Paesi



2026

NOTA SULL'ATTIVITÀ DEL GRUPPO DI LAVORO

Il gruppo di lavoro (GdL) “Comportamento sismico delle dighe in materiali sciolti: case histories in altri Paesi” è stato istituito a febbraio 2019. Tutti i componenti del gruppo sono membri young appartenenti allo YPF-ITCOLD e la supervisione è affidata all'esperienza dell'Ing. Rosella Caruana.

Le attività del gruppo consistono nella raccolta e nell'analisi interpretativa delle informazioni disponibili in letteratura tecnica e su contributi informativi sul comportamento di dighe, ubicate al di fuori del territorio Italiano, che sono state soggette a eventi sismici severi (Magnitudo > 5).

Di interesse, oltre al comportamento dello sbarramento, sono, ove disponibili, le informazioni relative ai danni, o all'assenza di essi, alle opere accessorie (scarichi, accessi, condotte, canali, gallerie, etc.), alle sponde del serbatoio e ai versanti, ai provvedimenti adottati nella gestione dello sbarramento immediatamente dopo l'evento sismico e le caratteristiche dell'evento sismico (PGA, distanza dalla diga, profondità, registrazioni, etc.).

L'obiettivo è l'individuazione, per le diverse tipologie di dighe in materiali sciolti, delle macro-modalità di comportamento in condizioni sismiche.

Anno costituzione: 2019

Coordinatrici: Giulia Buffi, Rosella Caruana

Membri del gruppo: Balsamo Alessandro, Canci Michele, Farronato Giacomo, Figini Raffaele, Palmieri Mattia, Previtali Riccardo, Taffini Elena, Zacchei Enrico.

<https://www.itcold.it/gruppo-di-lavoro/comportamento-delle-dighe-ai-sismi-in-altri-paesi-case-histories-di-rilievo/>

RINGRAZIAMENTI

Desideriamo ringraziare il Comitato Nazionale Italiano per le Grandi Dighe (ITCOLD) per averci dato l'opportunità di avviare questo gruppo di lavoro e di portare avanti le attività di ricerca e analisi alla base del presente Bollettino. Un sentito ringraziamento va inoltre ai numerosi Enti coinvolti, anche indirettamente, che in diversi casi ci hanno consentito l'accesso a dati e documentazione, rendendo possibile la raccolta della bibliografia e delle informazioni necessarie.

Figura di copertina tratta da [18].

SOMMARIO

1. INTRODUZIONE.....	7
2. DATI E METODI.....	10
2.1. Database.....	10
2.2. Metodologia	17
3. ANALISI SVOLTE E RISULTATI OTTENUTI	20
4. CONCLUSIONI	34
5. BIBLIOGRAFIA	37
6. ALLEGATI.....	39

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Esempi di danni osservati in sito su dighe in materiali sciolti interessate da terremoti: a) fessure in cresta alla diga di Reyhanli [21]; b) cedimenti verticali della diga di Coihueco [4]; c) rottura del rivestimento del paramento di monte della diga di Zipingpu [22]; d) liquefazione terreni di fondazione della diga di Sultansuyu [23]; e) scorrimenti superficiali sui paramenti delle dighe di Sultansuyu e Reyhanli [21].

Figura 2 - Collasso della diga di Fujinuma (2011) [9].

Figura 3 - Mappa delle PGA sisma di Tohoku, fonte [25].

Figura 4 - Mappa delle PGA in g della sequenza sismica turca (sopra; stazioni accelerometriche individuate con triangoli e dighe individuate con cerchi) e posizione delle dighe rispetto agli epicentri (sotto), fonte [16].

Figura 5 - Mappa delle PGA, sisma di Maule, fonte [19].

Figura 6 – Schema dei possibili meccanismi di danno di dighe in materiali sciolti in presenza di azioni sismiche (tratto da [24]).

Figura 7 - Modello di danno adottato da Swaisgood (modificato da [2]).

Figura 8 - Correlazione tra NCS e PGA. Database completo.

Figura 9 - Equazione di Swaisgood sovrapposta al database completo.

Figura 10 - Distribuzione geografica dei 41 nuovi casi e correlazione di Swaisgood.

Figura 11 - Correlazione NCS-PGA suddivisa per classi di magnitudo ed equazione di Swaisgood.

Figura 12 - Nuova correlazione NCS-PGA all'84% (linea tratteggiata), per $M_w = 6$.

Figura 13 - Nuova correlazione NCS-PGA all'84% (linea tratteggiata), per $M_w = 7$.

Figura 14 - Nuova correlazione NCS-PGA all'84% (linea tratteggiata), per $M_w = 8$.

Figura 15 - Nuova correlazione NCS-PGA all'84% (linea tratteggiata), per $M_w = 9$.

Figura 16 - Nuova equazione proposta per la stima di NCS, suddivisa per classi di magnitudo.

Figura 17 - Dati accorpati per Stato Limite raggiunto.

Figura 18 - Valori di NCS (%) accorpati per tipologia costruttiva.

Figura 19 - Distanza epicentrale in funzione della PGA. Dati accorpati in funzione della magnitudo.

Figura 20 - Distanza epicentrale in funzione della PGA. Dati relativi a terremoti con $M_w < 7.5$.

Figura 21 - Cedimenti in cresta normalizzati (NCS, %) in funzione della PGA, aggregati per distanza epicentrale [km]. Dati relativi a terremoti con $M_w < 7.5$.

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Lista dei 41 nuovi casi studio.

Tabella 2 - Lista dei 82 casi studio dal database di Swaisgood [2, 3].

Tabella 3 - (Continuazione Tabella 2).

Tabella 4 - Classificazione empirica del danno proposta da Swaisgood.

Tabella 5 - Classificazione del danno e correlazione con gli Stati Limite di NTD14, Aliberti et al. [15].

Tabella 6 - Valori massimi, minimi e medi dei cedimenti associati al superamento delle soglie di SLD e SLV/SLC.

Tabella 7 - Superamenti delle soglie di Stato Limite in funzione della tipologia costruttiva. Dati espressi in valore assoluto.

Tabella 8 - Superamenti delle soglie di Stato Limite in funzione della tipologia costruttiva. Dati espressi in % sui casi di superamento di ciascuno SL.

Tabella 9 - Selezione di casi caratterizzati da valori di $NCS \geq 1\%$ (soglia SLV).

1. INTRODUZIONE

Nel presente bollettino vengono descritti i risultati dell'attività del gruppo di lavoro del comitato italiano grandi dighe (ITCOLD) denominato "Comportamento sismico delle dighe in materiali sciolti: case histories in altri Paesi". Questo bollettino si concentra sul comportamento delle dighe in materiali sciolti interessate da eventi sismici a livello mondiale.

In generale, la valutazione delle deformazioni post evento sismico di una diga in materiali sciolti è un compito alquanto complesso. L'analisi numerica, tramite software avanzati e consolidati, consente di ottenere una stima delle deformazioni durante e dopo un terremoto, valutando la risposta sismica locale sulla base delle caratteristiche del sisma e dei terreni di fondazione, mediante procedimenti di calcolo di complessità variabile. Tuttavia, tali analisi non sono adatte a una valutazione speditiva della sicurezza della diga nelle fasi immediatamente successive ad un evento sismico.

Per queste ragioni, sono state avviate attività di ricerca alternative, finalizzate a definire una risposta semplificata delle dighe in materiali sciolti sottoposte ad azioni sismiche, come ad esempio i lavori presentati da Swaisgood [2, 3].

Le dighe in materiali sciolti possono essere principalmente suddivise in: i) strutture in terra omogenea; ii) strutture di terra zonate; iii) strutture in pietrame con nucleo in terra; iv) strutture costruite con il metodo del "riempimento idraulico"; v) strutture in terra o pietrame con manto e diaframma di tenuta in materiali artificiali [10]. Le "tailing dams", nell'ambito delle diverse tipologie di dighe in terra, costituiscono una classe speciale che, per le sue caratteristiche peculiari, non è stata considerata in questo lavoro.

I danni più frequenti osservati in casi reali di dighe in materiali sciolti interessate da eventi sismici consistono in fessure longitudinali o trasversali, che si verificano generalmente sul coronamento o nella parte più alta dei paramenti, in cedimenti in cresta della diga, nella liquefazione dei terreni granulari, nella rottura dei dispositivi di tenuta e in scorrimenti superficiali localizzati sui paramenti [21, 22]. In alcuni casi le fessure sono di lunghezza rilevante e si estendono all'interno del corpo diga lungo piani verticali; sono caratterizzate da aperture decrescenti dalla superficie verso il basso, con un orientamento verso i paramenti esterni man mano che la fessura si approfondisce.

Secondo quanto indicato da Arredi [1], i cedimenti delle dighe in materiali sciolti soggette ad azioni sismiche possono essere considerati una conseguenza diretta della compattazione indotta dalla vibrazione sismica. Inoltre, le fessure longitudinali della cresta possono essere attribuite a modesti scivolamenti interni derivanti dalle vibrazioni più elevate che si riscontrano nella parte superiore della diga o a cedimenti differenziali tra la zona centrale e i corpi laterali.

Nonostante spesso si tratti di effetti non gravi e facilmente riparabili, essi non vanno sottovalutati poiché potrebbero innescare altri meccanismi più pericolosi. Infatti, cedimenti eccessivi potrebbero

facilitare la tracimazione della diga, mentre le fessure nei dispositivi di tenuta (nucleo) potrebbero innescare filtrazioni e perdite d'acqua, anche incontrollate.

Alcuni esempi di danneggiamenti osservati sono illustrati in Figura 1. Tra i più recenti esempi di gravi danni riscontrati su dighe in materiali sciolti in occasione di eventi sismici si ricordano i danni rilevanti riscontrati alla diga di Zipingpu (anno del terremoto: 2008), costituita da una struttura in pietrame con paramento in calcestruzzo (CFRD) e interessata dalla rottura del manto di tenuta come mostrato nella Figura 1c, i danni alla diga di Coihueco (2010) interessata da elevati cedimenti verticali (Figura 1b) e alla diga di Fujinuma (2011), interessata da un cedimento elevato con successiva tracimazione e collasso della diga (Figura 2).



Figura 1 - Esempi di danni osservati in sito su dighe in materiali sciolti interessate da terremoti: a) fessure in cresta alla diga di Reyhanli [21]; b) cedimenti verticali della diga di Coihueco [4]; c) rottura del rivestimento del paramento di monte della diga di Zipingpu [22]; d) liquefazione terreni di fondazione della diga di Sultansuyu [23]; e) scorrimenti superficiali sui paramenti delle dighe di Sultansuyu e Reyhanli [21].

I fattori ritenuti più importanti che governano il comportamento delle dighe in materiali sciolti in condizioni sismiche sono i parametri del moto sismico, come la magnitudo e la massima accelerazione al suolo (PGA), la distanza epicentrale della sorgente sismica rispetto al sito della diga, la geometria della struttura (in particolare l'altezza), la tipologia di diga e il livello d'invaso durante l'evento sismico.

Inoltre, a parità di input sismico, l'analisi del comportamento di diversi casi storici dimostra che un ruolo fondamentale è svolto dalle caratteristiche della diga, ovvero il tipo di costruzione, la natura dei materiali utilizzati e le condizioni geotecniche, come riportato in USCOLD [14]. In merito alla natura dei materiali utilizzati, le evidenze dimostrano che la maggior parte delle dighe in terra ben costruite è stata in grado di resistere a forti terremoti senza effetti particolarmente negativi: in particolare quelle

costruite con materiali argillosi compattati su fondazione in argilla o roccia hanno storicamente resistito a livelli di scuotimento del terreno estremamente elevati, anche quando venivano utilizzate procedure di compattazione inadeguate. Al contrario, i vecchi sbarramenti costruiti con sabbie o limi non ben compattati rappresentano quasi tutti i casi noti di cedimento, principalmente a causa della liquefazione di questi materiali.



Figura 2 - Collasso della diga di Fujinuma (2011) [9].

Invece, per quanto riguarda il tipo di costruzione, generalmente le dighe in “rockfill” o CFRD sono considerate le più stabili se sottoposte ad azioni sismiche e rappresentano una tipologia costruttiva adeguata in aree ad alta sismicità [13]. Tuttavia, esistono alcune eccezioni come, ad esempio, la già citata diga di Zipingpu, che ha mostrato come le lastre di calcestruzzo a monte possano danneggiarsi, inducendo potenzialmente filtrazioni attraverso il corpo diga.

Lo scopo di questo bollettino consiste nel fornire una valutazione preliminare e diretta del danneggiamento basata sul comportamento osservato delle dighe in materiali sciolti durante eventi sismici al fine di ottenere un metodo empirico di supporto alle scelte di gestione post evento sismico e di controllo dei risultati delle analisi numeriche; lo studio attraverso metodi semplificati dei casi relativi alle deformazioni delle dighe in terra causate da eventi sismici è in corso già dal 1990 [3].

Nella valutazione dei danni dopo un evento sismico sono stati considerati sia quelli riscontrati sul corpo della diga che quelli relativi alle strutture ausiliarie, inoltre anche l'assenza di danni è stata considerata un risultato da tenere in conto.

Nel Capitolo 2 si presenta il database esistente dei casi storici (Swaigood, 2014), che è stato esteso con l'aggiunta di 41 nuovi casi, e il criterio con cui sono stati classificati i diversi comportamenti osservati. L'analisi dei dati contenuti nel database è illustrata nel Capitolo 3. Le conclusioni sono discusse nel Capitolo 4. Infine, in Allegato sono state inserite tutte le schede tecniche delle 41 dighe

aggiunte in questo lavoro, con l'indicazione delle caratteristiche della diga e del terremoto, in modo da rendere il bollettino pratico e utile da consultare.

2. DATI E METODI

Il metodo utilizzato per la valutazione e classificazione del danno segue l'approccio proposto da Swaisgood [2, 3] che mira a produrre una correlazione tra il grado di danno e i fattori principali che lo governano a partire da un database di casi storici contenenti le informazioni principali inerenti la diga, il terremoto che l'ha interessata e il livello di danneggiamento. I cedimenti misurati sono stati poi associati poi allo Stato Limite raggiunto in conformità con la normativa tecnica italiana (DM 26/06/2014 [5])

Di seguito viene presentato il database aggiornato e ampliato a partire da quello proposto da Swaisgood [3] e, successivamente, la metodologia di classificazione del danno.

2.1. Database

I casi studio considerati in questo lavoro sono stati raccolti in un database che include 123 eventi, i quali documentano gli effetti e i danneggiamenti prodotti da eventi sismici su 103 diverse dighe in terra. Il database rappresenta un'estensione di quello proposto originariamente da Swaisgood nel 2003 [2], che conteneva 69 casi, successivamente ampliato a 82 nel 2014 [3].

I 41 nuovi casi aggiunti nel presente lavoro comprendono: 10 eventi relativi ad altrettante dighe, ricavati dalla pubblicazione di Sica e Pagano [13]; 14 riferiti alla sequenza sismica che ha colpito la Turchia nel 2023; e 17 casi aggiuntivi descritti nei volumi del comitato statunitense sulle grandi dighe (USCOLD) [4, 6, 14].

Tra i principali eventi sismici considerati nel database, si descrivono di seguito i tre casi di maggiore rilievo: il sisma di Maule (Cile, 2010), il sisma di Tohoku (Giappone, 2011) e la sequenza sismica turca (2023).

Sisma di Tohoku (Giappone, 2011)

Il sisma di Tohoku (11 marzo 2011, ore 14:46 JST, Mw 9.0) è il più elevato mai registrato in Giappone. È stato generato da una faglia inversa lungo l'interfaccia tra la placca del Pacifico e quella Nordamericana, con epicentro nell'Oceano Pacifico al largo della costa Tōhoku (38.1°N, 142.9°E) e profondità di 24 km. La superficie di rottura stimata è di circa 450 km per 150 km, con scorrimenti massimi significativi e una durata di 150–300 s. La PGA massima registrata ha superato 1.0g in circa 10

stazioni della rete accelerometrica nazionale (vedi Figura 3) gestita dal NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience).

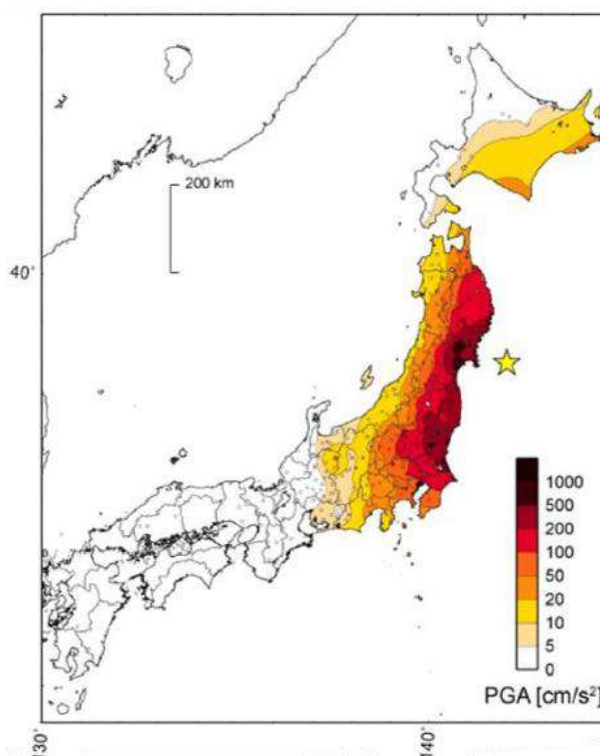


Figura 3 - Mappa delle PGA sisma di Tohoku, fonte [25].

Sequenza Sismica Turca (2023)

La sequenza sismica turca ha avuto inizio il 6 febbraio 2023 con un primo mainshock di Mw 7.8 alle ore 04:17 (epicentro 37.29°N–37.04°E, profondità 8.6 km, rottura di faglia di circa 300 km). Circa 10 minuti dopo si è verificata una forte replica di Mw 6.7 sul segmento Nurdağı della stessa faglia. Nella stessa giornata, alle ore 13:24, un secondo mainshock di Mw 7.5 ha interessato la zona di Elbistan (faglia Çardak-Sürgü, epicentro 38.09°N–37.24°E, profondità 7.0 km, rottura di circa 160 km). Il 20 febbraio 2023 una scossa di Mw 6.3 a profondità di 21.7 km, ha colpito la zona di Hatay (Figura 4).

Nel caso della sequenza sismica turca i valori di PGA assunti sono derivanti da un confronto tra i dati disponibili in letteratura e i dati messi a disposizione dalle autorità nazionali [20]. I valori di PGA massima registrata per il mainshock di Mw 7.8 variano tra 0.1g e 1.3g mentre per l'evento di Mw 7.5 tra 0.15g e 0.45g.

Sisma di Maule (Cile, 2010)

Il terremoto di Maule (27 febbraio 2010, ore 3:34 locali, Mw 8.8) è il sesto più forte mai registrato nella storia strumentale. È stato generato da una faglia inversa tra la placca di Nazca e quella Sudamericana, con epicentro nella regione centro-meridionale del Cile (36.1°S, 72.9°W), profondità di

22.9 km e una superficie di rottura di circa 550 km per 170 km. La durata dello scuotimento è stata fino a 2 minuti, con PGA massima registrata superiore a 0.92g nella città di Angol. Un primo aftershock di Mw 6.2 si è verificato circa 20 minuti dopo il mainshock (Figura 5).

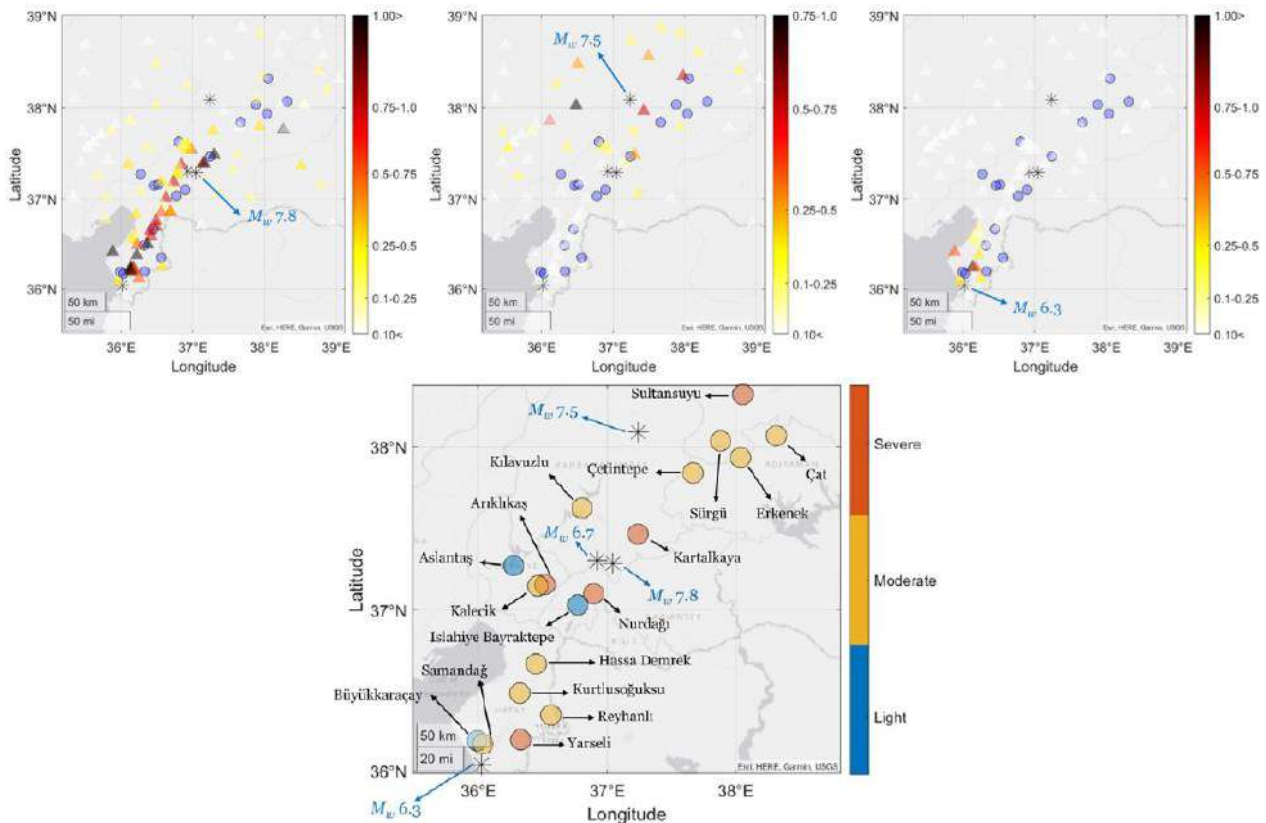


Figura 4 - Mappa delle PGA in g della sequenza sismica turca (sopra; stazioni accelerometriche individuate con triangoli e dighe individuate con cerchi) e posizione delle dighe rispetto agli epicentri (sotto), fonte [16].

La Tabella 1 riporta i 41 nuovi casi studio. Le informazioni sono suddivise in dati di input, che comprendono le principali caratteristiche della diga e dell'evento sismico, e dati di output, in termini di danno osservato, rappresentato dal cedimento normalizzato in cresta (NCS) e lo stato limite (SL) raggiunto. Le caratteristiche delle dighe incluse nel database comprendono: nome, ubicazione geografica, anno di costruzione, lunghezza in cresta (LC), altezza della diga (H) e spessore dei depositi alluvionali (AT). Le proprietà dei terremoti raccolte sono: data dell'evento, magnitudo momento (M_w), distanza epicentrale (D) e accelerazione massima al sito della diga (PGA), se disponibile dal sistema di monitoraggio o stimata dalle mappe di accelerazione di USGS [19].

Per ognuna delle 41 dighe, sono stati predisposti altrettanti rapporti tecnici, contenenti ulteriori dettagli sul comportamento sismico e sulle misure di sicurezza adottate dopo il sisma; i rapporti sono riportati in Allegato al Bollettino.

Per completezza, la Tabella 2 include anche gli 82 casi studio e i relativi eventi sismici contenuti nel database di Swaisgood¹ [2, 3].

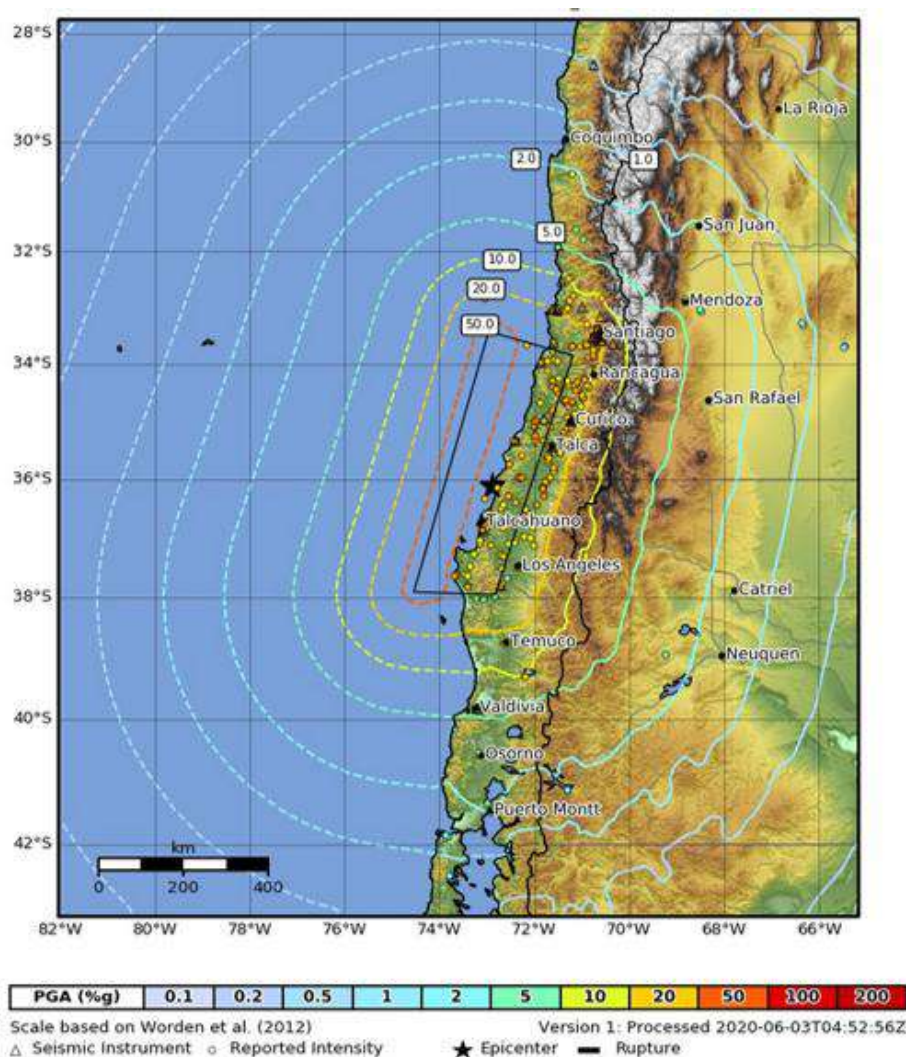


Figura 5 - Mappa delle PGA, sisma di Maule, fonte [19].

In analogia a quanto proposto da Swaisgood, non sono stati inclusi nella trattazione i casi in cui i cedimenti sono stati indotti da fenomeni di liquefazione.

Nella trattazione non sono stati inclusi alcuni casi più recenti quali le dighe di Yan Aung Myin e di Chaungmagyi (sisma di Mandalay del 28.3.2025 - Mw 7.7) in quanto non disponibili sufficienti dati.

¹ Per la diga di Hebgen (USA) è stato riportato il valore della Magnitudo (M_w) proposto da USGS, pari a 7.2, in sostituzione di quello riportato sull'articolo originale di Swaisgood [2, 3] di 7.6. Inoltre la diga di Qyrdaq è stata riclassificata come tipo "CFRD".

Tabella 1 - Lista dei 41 nuovi casi studio.

	Caratteristiche della diga						Caratteristiche del sisma				Output	
Nome della diga	Ubicazione	Anno costruzione	Tipo	LC (m)	H (m)	AT (m)	Data (gg-mm-aa)	M _w	D (km)	PGA (g)	NCS % (Eq. (1) o Eq. (2))	SL raggiunto
Fujinuma	Giappone	1949	E	133.2	18.5	N/D	11-mar-2011	9.0	220	0.32	5.95	SLC
Koromogawa		1963	E	212	35.5	N/D	11-mar-2011	9.0	151	0.50	0.88	SLD
Nishigo		1955	E	220	32.5	N/D	11-mar-2011	9.0	235	0.27	0.24	SLO
Minamikawa		1987	CFRD	335	19.6	N/D	11-mar-2011	9.0	182	0.27	0.46	SLD
Lower Mura-Yama		1924	E	610	16	0	1-set-1923	7.9	61	0.42	0.33	SLO
Otaniike		1941	E	84	26.8	0	21-dec-1946	8.3	80	0.01	0	Nessuno
Shin-Yamamoto		1954	ECRD	1392	42.4	0	23-oct-2004	6.6	5	0.50	1.89	SLV
Oya		1993	E	250	56.2	N/D	1-jan-2024	7.5	14	0.53	0.64	SLD
Gosho		1981	ECRD	327	52	N/D	26-may-1983	7.4	186	0.75	0	Nessuno
Miho		1978	E	588	95	N/D	29-jun-1980	6.3	68	0.03	0	Nessuno
Tsengwen	Taiwan	1973	E	400	133	N/D	21-set-1999	7.6	73	0.03	0.02	Nessuno
Nanhua		1994	E	511	87.5	N/D	21-set-1999	7.6	87	0.04	0.01	Nessuno
Mudan (Mu-Tan)		1995	E	446	62.5	N/D	21-set-1999	7.6	182	0.10	0.02	Nessuno
Renyitan (Jenytan)		1987	E	1535	28	N/D	21-set-1999	7.6	60	0.68	0.10	SLO
Tousheh (Shuishe)		-	E	-	21.8	N/D	21-set-1999	7.6	13	0.46	1.26	SLV
Lantan		-	ECRD	-	31	N/D	21-set-1999	7.6	61	0.25	0.08	Nessuno
Wushantou		1930	HF	1273	56	N/D	21-set-1999	7.6	89	0.10	0.05	Nessuno
Yunhoshan (Hushan)		-	E	-	62.5	N/D	21-set-1999	7.6	37	0.10	0	Nessuno
Binga	Filippine	1960	ECRD	102	215	N/D	16-jul-1990	7.7	15	0.60	0.84	SLD
Long valley	USA	1941	E	183	55.2	0	27-may-1980	6.2	N/D	0.52	0.26	SLO
Melado	Cile	1991	ECRD	310	90	48	27-feb-2010	8.8	30.0	0.15	0.07	Nessuno
Coiheuco		1974-1960	ECRD	1040	29	0	27-feb-2010	8.8	138	0.57	13.79	SLC
Colbun		1985	ECRD	550	116	68	27-feb-2010	8.8	183	0.37	0.05	Nessuno
Darbandikhan	Iraq	1961	ECRD	445	128	N/D	22-nov-2017	7.3	32	0.36	0.38	SLO
Surgu	Turchia	1971	ECRD	736	55	0	5-may-1986	5.9	10	0.20	0.27	SLO
Surgu		1971	ECRD	736	55	0	6-feb-2023	7.8	120	0.14	0.27	SLO
Sultansuyu		1993	E	721	60	N/D	6-feb-2023	7.5	83	0.48	1.33	SLV
Ariklikas		1998	E	355	33	N/D	6-feb-2023	7.8	45	0.34	1.52	SLV
Yarseli		1991	E	960	45	N/D	6-feb-2023	7.8	129	0.54	0.56	SLD
Kartalkaya		1972	E-HF	-	57	0	6-feb-2023	7.8	34	0.66	1.75	SLV
Reyhanti		2020	E-ECRD	9271	30	N/D	6-feb-2023	7.8	102	0.23	1.67	SLV
Cat		1996	ECRD	267	78	N/D	6-feb-2023	6.0	19	0.16	0.51	SLD
Kalecik		1985	CFRD	194	80	N/D	6-feb-2023	7.8	50	0.33	0.50	SLD
Aslantas		1984	E	566	95	N/D	6-feb-2023	7.8	66	0.18	0.05	Nessuno
Hassa-demrek		2006	E	503	30	N/D	6-feb-2023	7.8	80	0.71	1.0	SLV
Kirikhan-Kutlusoguksu		2017	ECRD	419	40	N/D	6-feb-2023	7.8	103	0.75	1.50	SLV
Nurdagi-Hamidiye		2018	ECRD	182	29	N/D	6-feb-2023	7.8	18	0.61	1.55	SLV
Kilavuzlu		2014	E	556	61	N/D	6-feb-2023	7.8	40	0.15	0.41	SLD
Zadeja	Albania	1971	ECRD	387	60	N/D	26-nov-2019	6.2	65.2	0.04	0	Nessuno
Qyrsaqi		1971	ECRD	514	54	N/D	26-nov-2019	6.2	65	0.07	0	Nessuno
Koman		1988	CFRD	290	115.5	N/D	26-nov-2019	6.2	79.7	0.03	0	Nessuno

Legenda:

Tipo: ECRD = Diga in pietrame con nucleo in terra; E = Diga in terra; CFRD = Diga in pietrame con paramento in calcestruzzo; HF = Diga in riempimento idraulico; **LC:** lunghezza del coronamento; **H:** altezza della diga; **AT:** spessore dei depositi alluvionali; **M_w:** magnitudo momento; **D:** distanza epicentrale; **PGA:** accelerazione massima del terreno al sito della diga; **NCS %:** cedimento normalizzato in cresta in percentuale; **Stato Limite raggiunto:** SLO = Stato limite di operatività; SLD = SL di danno; SLV = SL di salvaguardia della Vita; SLC = SL di collasso.

Tabella 2 - Lista dei 82 casi studio dal database di Swaisgood [2, 3].

	Caratteristiche della diga						Caratteristiche del sisma				Output	
Nome della diga	Ubicazione	Anno costruzione	Tipo	LC (m)	H (m)	AT (m)	Data (gg-mm-aa)	M _w	D (km)	PGA (g)	NCS %	SL raggiunto
Upper Mura-Yama	Giappone	1923	E-HF	320	24	3	1-set-1923	8.2	18	0.32	0.74	SLD
Ono		1914	E	309	41	11	1-set-1923	8.2	98.2	0.30	0.53	SLD
Miboro		1961	ECRD	444	130	0	19-ago-1961	7.0	20	0.15	0.02	Nessuno
Minase		1963	CFRD	210	67	0	16-giu-1964	7.5	144.9	0.08	0.09	Nessuno
Namioka		1983	ECRD	265	52	0	26-mag-1983	7.7	144.9	0.08	0.11	SLO
Makio		1961	ECRD	264	77	29	14-set-1984	6.8	5.2	0.57	0.47	SLD
Nagara		1985	ECRD	N/D	52	N/D	17-dic-1987	6.9	28.8	0.27	0.04	Nessuno
Kawanishi		1980	ECRD	170	43	3	23-ott-2004	6.6	6	0.57	0.65	SLD
Aratozawa		1998	ECRD	414	74	0	8-giu-2008	6.9	2	0.86	0.54	SLD
Ishibuchi		1953	CFRD	271	54	0	8-giu-2008	6.9	4	0.67	1.0	SLV
Kamiosawa		2003	E	229	19	N/D	8-giu-2008	6.9	10	0.44	0.74	SLD
Koda		2005	ECRD	520	44	0	8-giu-2008	6.9	8	0.49	0.09	Nessuno
Koromogawa		1963	E	212	36	0	8-giu-2008	6.9	5.5	0.55	0.55	SLD
Minase		1963	CFRD	210	67	0	8-giu-2008	6.9	19	0.31	0.21	SLO
Surikamigawa		2006	ECRD	718	105	0	11-mar-2011	9.0	125	0.11	0.16	SLO
Ishibuchi		1953	CFRD	271	54	0	11-mar-2011	9.0	130	0.19	0.02	Nessuno
Kejonusma		1995	E	260	24	0	11-mar-2011	9.0	100	0.274	0.58	SLD
Zipingpu	Cina	2006	CFRD	635	156	14	12-mag-2008	7.9	11.3	0.49	0.47	SLD
Bikou		1983	ECRD	298	102	40	12-mag-2008	7.9	25.3	0.35	0.11	SLO
Tsengwen	Taiwan	1973	ECRD	N/D	131	N/D	14-apr-1976	5.3	8	0.16	0.03	Nessuno
Masiway	Filippine	1977	E	427	25	3	16-lug-1990	7.7	2.7	0.68	3.79	SLC
Pantabangan		1975	ECRD	732	114	0	16-lug-1990	7.7	5.6	0.58	0.24	SLO
Aya		1975	ECRD	427	102	0	16-lug-1990	7.7	6	0.58	0.20	SLO
Diayo		1976	ECRD	201	60	0	16-lug-1990	7.7	17.5	0.38	0.11	SLO
Canili		1976	ECRD	351	70	0	16-lug-1990	7.7	17.5	0.38	0.06	Nessuno
Magat		1985	ECRD	1296	100	0	16-lug-1990	7.7	80.5	0.05	0.01	Nessuno
Ambuklao		1956	ECRD	450	120	5	16-lug-1990	7.7	10	0.49	0.88	SLD
El Infiernillo	Messico	1964	ECRD	340	146	0	11-ott-1975	5.9	78.9	0.08	0.03	Nessuno
La Villita		1966	ECRD	427	60	75	15-nov-1975	7.2	20	0.04	0.02	Nessuno
El Infiernillo		1964	ECRD	340	146	0	15-nov-1975	7.2	22.9	0.09	0.02	Nessuno
El Infiernillo		1964	ECRD	340	146	0	14-mar-1979	7.6	95	0.12	0.09	Nessuno
La Villita		1966	ECRD	427	60	75	14-mar-1979	7.6	107.9	0.02	0.03	Nessuno
La Villita		1966	ECRD	427	60	75	25-ott-1981	7.3	30.6	0.09	0.11	SLO
El Infiernillo		1964	ECRD	340	146	0	25-ott-1981	7.3	54.7	0.05	0.04	Nessuno
El Infiernillo		1964	ECRD	340	146	0	19-set-1985	8.1	75.7	0.13	0.08	Nessuno
La Villita		1966	ECRD	427	60	75	19-set-1985	8.1	43.5	0.13	0.24	SLO
La Villita		1966	ECRD	427	60	75	21-set-1985	7.5	61.2	0.04	0.09	Nessuno
Cogoti	Cile	1939	CFRD	159	85	0	6-apr-1943	7.9	88.6	0.20	0.44	SLD
Aromos		1979	ECRD	220	43	9	3-mar-1985	7.8	45	0.25	0.18	SLO
Paloma		1967	ECRD	1000	82	14	14-ott-1997	7.6	45	0.23	0.14	SLO
Cogoti		1939	CFRD	160	83	0	14-ott-1997	7.6	45	0.23	0.30	SLO
Santa Juana		1995	CFRD	390	113	19	14-ott-1997	7.6	260	0.03	0.02	Nessuno
Covento Viejo		2008	ECRD	600	36	55	27-feb-2010	8.8	70	0.49	0.39	SLO
Malpasso	Perù	1936	ECRD	152	78	30	10-ott-1938	6.0	N/D	0.10	0.07	Nessuno
Torata		2001	CFRD	600	120	0	23-giu-2001	8.3	100	0.15	0.04	Nessuno
Matahina	Nuova Zelanda	1967	ECRD	400	86	N/D	2-mar-1987	6.3	8.5	0.33	0.14	SLO

Tabella 3 - (Continuazione Tabella 2).

	Caratteristiche della diga						Caratteristiche del sisma				Output	
Nome della diga	Ubicazione	Anno costruzione	Tipo	LC (m)	H (m)	AT (m)	Data (gg-mm-aa)	M _w	D (km)	PGA (g)	NCS %	SL raggiunto
Austrian	USA	1950	E	213	56	0	17-ott-1989	7.1	1.6	0.57	1.51	SLV
Lexington		1953	E	253	63	0	17-ott-1989	7.1	3.2	0.45	0.41	SLD
Guadalupe		1935	E	204	43	0	17-ott-1989	7.1	9.7	0.42	0.45	SLD
Elmer J. Chesbro		1955	E	220	29	0	17-ott-1989	7.1	12.9	0.42	0.39	SLO
Vasona		1935	E	149	10	8	17-ott-1989	7.1	8.9	0.37	0.27	SLO
Leroy Anderson		1950	ECRD	427	72	0	17-ott-1989	7.1	20.9	0.26	0.06	Nessuno
San Justo		1987	ECRD	340	40	14	17-ott-1989	7.1	27.4	0.26	0.07	Nessuno
Uvas		1957	E	335	32	N/D	17-ott-1989	7.1	9.7	0.40	0.06	Nessuno
Stevens Creek		1935	E	305	37	N/D	17-ott-1989	7.1	16	0.30	0.04	Nessuno
Almaden		1935	E	140	32	N/D	17-ott-1989	7.1	8.8	0.44	0.10	SLO
Calero		1935	E	256	30	N/D	17-ott-1989	7.1	12.9	0.38	0.03	Nessuno
Rinconada		1969	E	73	12	N/D	17-ott-1989	7.1	9.2	0.41	0.15	SLO
Cogswell		1934	CFRD	200	81	0	28-giu-1991	5.8	7	0.37	0.05	Nessuno
Robert Matthews		1962	E	192	46	0	25-apr-1992	6.9	64.4	0.07	0.01	Nessuno
Wide Canyon		1967	E	678	26	N/D	28-giu-1992	7.5	29.8	0.20	0.05	Nessuno
Yucaipa No. 1		1977	E	128	13	9	28-giu-1992	6.6	28.3	0.15	0.03	Nessuno
Yucaipa No. 2		1977	E	146	15	9	28-giu-1992	6.6	28.3	0.15	0.02	Nessuno
U. San Fernando		1921	HF	390	25	18	17-gen-1994	6.7	10.3	0.42	1.02	SLV
L. San Fernando		1915	E-HF	537	38	6	17-gen-1994	6.7	9.5	0.44	0.46	SLD
Los Angeles		1977	E	671	47	0	17-gen-1994	6.7	9.8	0.43	0.19	SLO
North Dike		1977	E	427	36	0	17-gen-1994	6.7	10.1	0.43	0.09	Nessuno
Lower Franklin		1922	HF	152	31	N/D	17-gen-1994	6.7	18.2	0.30	0.15	SLO
Santa Felicia		1955	E	389	65	0	17-gen-1994	6.7	33.3	0.18	0.03	Nessuno
Cogswell		1934	CFRD	200	81	0	17-gen-1994	6.7	52.6	0.10	0.03	Nessuno
Chatsworth No. 2		1918	HF	610	12	N/D	30-ago-1930	5.3	1	0.40	0.63	SLD
South Haiwee		1912	HF	457	25	38	21-lug-1952	7.7	151.3	0.05	0.04	Nessuno
Uvas		1957	E	335	32	N/D	18-dic-1967	5.3	11.3	0.20	0.06	Nessuno
U. San Fernando		1921	HF	390	25	18	9-feb-1971	6.6	1.6	0.55	2.11	SLV
Oroville		1967	ECRD	1707	235	0	1-ago-1975	5.9	6.9	0.10	0	Nessuno
Vermilion		1954	E	1290	50	50	27-mag-1980	6.3	22	0.24	0.05	Nessuno
Coyote		1936	E	299	43	0	24-apr-1984	6.2	0	0.63	0.18	SLO
Letoy Anderson		1950	ECRD	427	72	0	24-apr-1984	6.2	2.4	0.41	0.02	Nessuno
Elmer J. Chesbro		1955	E	220	29	0	24-apr-1984	6.2	22.2	0.18	0.05	Nessuno
Uvas		1957	E	335	32	N/D	24-apr-1984	6.2	29.0	0.14	0.08	Nessuno
Upper Lake Mary		1941	E	247	13	1	29-apr-1993	5.5	77.3	0.02	0	Nessuno
Hebgen		1914	E	213	25	10	17-ago-1959	7.2	0.2	0.71	4.82	SLC

Legenda:

Tipo: ECRD = Diga in pietrame con nucleo in terra; E = Diga in terra; CFRD = Diga in pietrame con paramento in calcestruzzo; HF = Diga in riempimento idraulico; **LC:** lunghezza del coronamento; **H:** altezza della diga; **AT:** spessore dei depositi alluvionali; **M_w:** magnitudo momento; **D:** distanza epicentrale; **PGA:** accelerazione massima del terreno al sito della diga; **NCS %:** cedimento normalizzato in cresta in percentuale; **Stato Limite raggiunto:** SLO = Stato limite di operatività; SLD = SL di danno; SLV = SL di salvaguardia della Vita; SLC = SL di collasso.

2.2. Metodologia

Definito il nuovo database dei casi storici a livello mondiale, è stata effettuata una correlazione tra i danni osservati e le caratteristiche dell'evento sismico.

A tal fine, è stata presa come riferimento la relazione proposta da Swaisgood [2, 3], con l'obiettivo di affinare i risultati già pubblicati grazie all'ampliamento dei casi storici considerati e di classificare gli effetti dei terremoti in conformità con la normativa tecnica italiana [5], attraverso una correlazione tra il livello di danno e lo stato limite raggiunto, seguendo l'approccio proposto nello studio di Aliberti et al. [15].

Il punto di partenza del metodo è la definizione di un unico parametro globale rappresentativo della deformazione sismica dello sbarramento. Il parametro scelto da Swaisgood, e adottato anche nel presente lavoro, è il cedimento in cresta per i seguenti motivi:

- è la misura di danno più frequentemente riportata nei casi studio;
- è direttamente correlata alla severità delle deformazioni e fessure;
- costituisce una sintesi dei diversi meccanismi di danno (compattazione, scorrimenti, fessurazioni, etc.; vedi Figura 6).

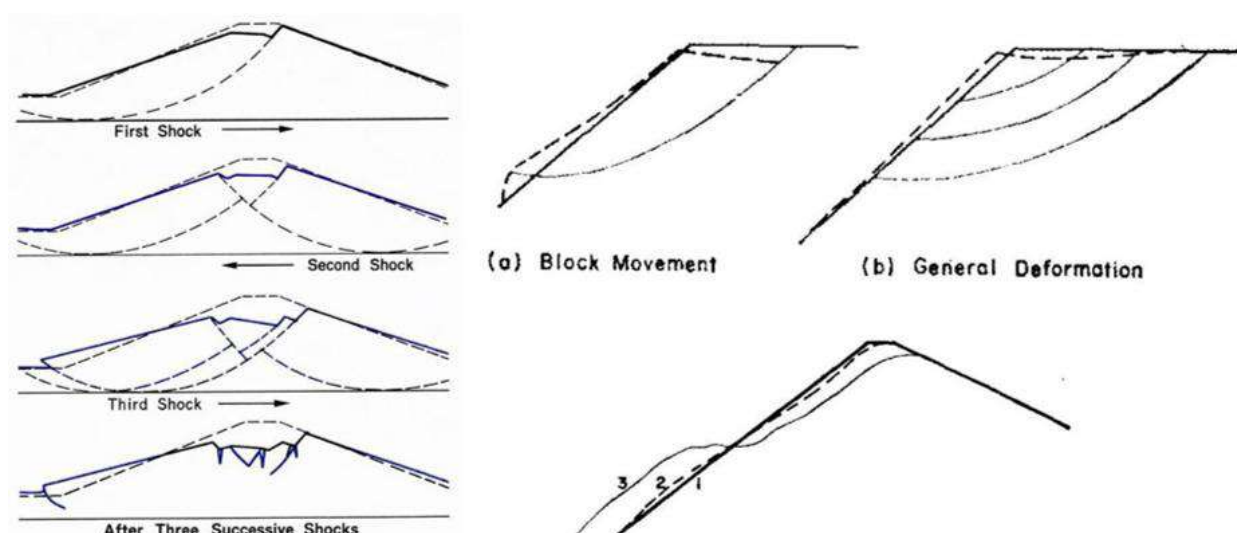


Figura 6 – Schema dei possibili meccanismi di danno di dighe in materiali sciolti in presenza di azioni sismiche (tratto da [24]).

Per poter rendere confrontabile il parametro di danno osservato in strutture con caratteristiche geometriche differenti, il cedimento in cresta misurato in campo è normalizzato rispetto all'altezza della diga e dello spessore dei terreni di fondazione secondo l'espressione:

$$NCS(\%) = \frac{CS(m)}{DH + AT} \quad (1)$$

Il modello di Swaisgood per la stima del danno è mostrato in Figura 7.



Figura 7 - Modello di danno adottato da Swaisgood (modificato da [2]).

Il cedimento normalizzato così ottenuto rappresenta l'indice di riferimento per la stima del comportamento globale della diga e le sue prestazioni sismiche. Il cedimento in cresta normalizzato può essere anche calcolato mediante la correlazione con i parametri del moto sismico proposta da Swaisgood [3]:

$$NCS(\%) = e^{(5.70PGA + 0.471M_w - 7.22)} \quad (2)$$

Questa correlazione è stata ottenuta per mezzo di un'analisi statistica di regressione multipla su 82 casi storici. Tra i diversi fattori considerati, solo l'accelerazione massima al sito (PGA) e la Magnitudo dell'evento sismico sono risultati influenti nel determinare l'entità di NCS. Altri fattori, come la tipologia di diga, la geometria e il livello d'invaso durante il sisma, hanno dimostrato un'influenza marginale nella correlazione.

Il vantaggio di questo modello consiste nella praticità e può essere adottato per una stima preliminare del danno atteso mentre, di contro, trascura i possibili cedimenti in altre direzioni e possibili meccanismi di rottura più complessi.

Sulla base dei valori di NCS misurati in sito è possibile classificare il grado di danno della diga sulla base della classificazione empirica proposta da Swaisgood e riportata in Tabella 4. Questa classificazione è stata ottenuta mediante definizione di quattro classi di danno sulla base del confronto tra danni osservati in sito per diversi casi storici e, successivamente, sono stati individuati i valori di NCS dei casi ricadenti in ciascuna classe. Le classi di "danno nullo" o "minore" comprendono tutti quei casi in cui la struttura è rimasta in esercizio in seguito ad ispezioni visive, mentre la classe di danno

“grave” comprende i casi in cui a seguito del sisma si è imposto un abbassamento del livello d’invaso e l’impianto è stato posto fuori servizio.

Tabella 4 - Classificazione empirica del danno proposta da Swaisgood.

Grado di danno	NCS (%)
nullo	meno di 0.02
nullo-minore	0.02 – 0.10
minore-moderato	0.10 – 0.50
moderato-grave	0.50 – 1.00
grave	più di 1.00

La proposta di Swaisgood è stata recentemente aggiornata da Aliberti et al. [15] al fine di ottenere una correlazione tra i valori del cedimento in cresta normalizzato (NCS) e gli stati limite individuati dalla Normativa Tecnica Italiana per la progettazione delle dighe del 2014 [5].

Le norme tecniche italiane stabiliscono una valutazione della sicurezza delle dighe in relazione agli Stati Limite e non a un indice di danno. Lo Stato Limite è una condizione dell’impianto di ritenuta, superata la quale non è più possibile garantire le funzioni per cui l’impianto è stato progettato e costruito. La Normativa individua le seguenti cinque categorie, caratterizzate da un livello di danneggiamento crescente:

1. Normale operatività.
2. Danni riparabili, senza rilascio incontrollato di acqua.
3. Danni non riparabili, senza rilascio incontrollato di acqua.
4. Danni che determinano il rilascio incontrollato di acqua, o comunque rischio di perdite di vite umane.
5. Collasso dello sbarramento.

La transizione tra le diverse categorie definisce quattro stati limite: due di esercizio (stato limite di operatività, SLO, e stato limite di danno, SLD) e due ultimi (stato limite di salvaguardia della vita, SLV, e stato limite di collasso, SLC). A differenza dell’approccio empirico proposto da Swaisgood, la Normativa Italiana prevede un approccio prestazionale senza soglie univoche di danno, in cui il giudizio ingegneristico ha un ruolo centrale nella valutazione della sicurezza dell’impianto.

La classificazione proposta da Aliberti et al. [15], riportata in Tabella 5 e ottenuta con un approccio simile a quella di Swaisgood, permette di unire l’approccio prestazionale previsto dalla Norma con un approccio empirico di tipo prescrittivo per la stima della prestazione sismica di una diga in materiali sciolti. Le soglie di transizione tra i differenti stati limite sono state definite in modo da includere la maggioranza dei casi osservati pur mantenendo un approccio conservativo.

Tabella 5 - Classificazione del danno e correlazione con gli Stati Limite di NTD14, Aliberti et al. [15].

Livello di danno	Descrizione prestazionale	Stato limite	NCS
nullo	Nessun danno con piena sicurezza e funzionalità dell'impianto	SLO	$0.1\% \leq \text{NCS} < 0.4\%$
minore	Danni riparabili senza rilascio incontrollato d'acqua	SLD	$0.4\% \leq \text{NCS} < 1.0\%$
moderato	Danni non riparabili senza rilascio incontrollato d'acqua	SLV	$1.0\% \leq \text{NCS} < 2.5\%$
grave	Instabilità generale della diga, rilascio incontrollato d'acqua e possibile collasso	SLC	$\text{NCS} \geq 2.5\%$

Il cedimento normalizzato in cresta per i 41 nuovi casi studio è stato calcolato mediante l'Eq. (1), qualora il valore reale del cedimento risultasse disponibile in letteratura; per 5 casi, in assenza di misure sperimentali, è stato stimato tramite l'Eq. (2). Per le restanti dighe già incluse nel database di Swaisgood è stato mantenuto il valore di cedimento normalizzato originariamente riportato dall'autore.

3. ANALISI SVOLTE E RISULTATI OTTENUTI

L'intero database analizzato, costituito complessivamente da 123 casi, è rappresentato nella Figura 8, sotto forma di correlazione (in scala semi-logaritmica) tra PGA e NCS.

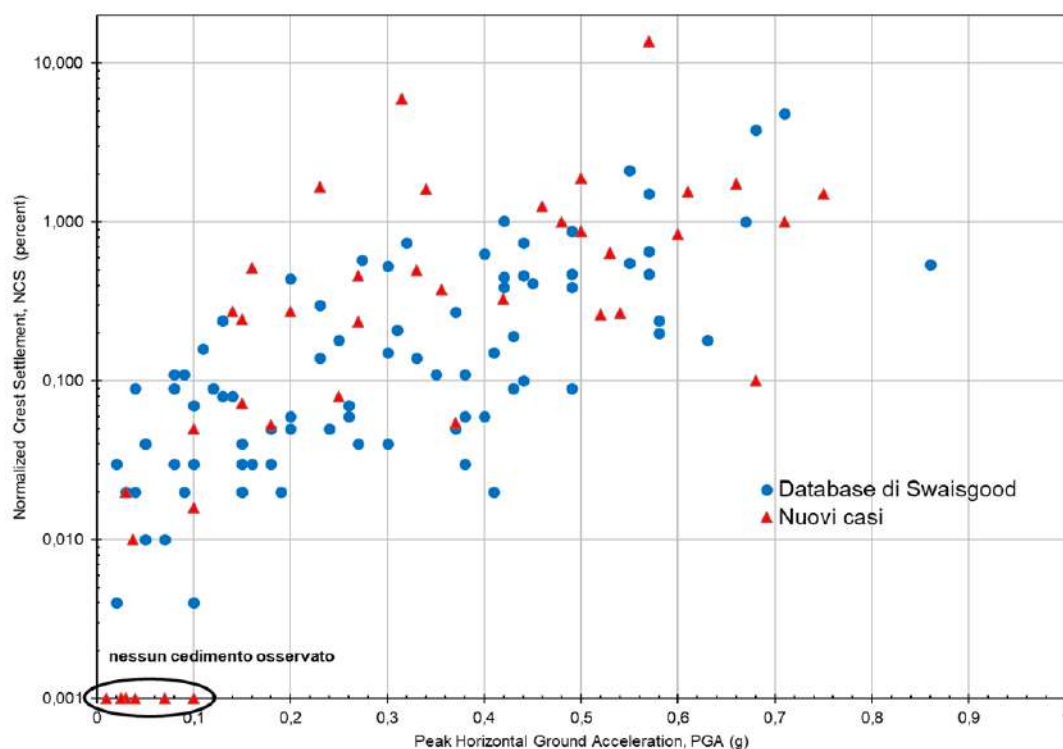


Figura 8 - Correlazione tra NCS e PGA. Database completo.

I 41 nuovi casi forniscono maggiori informazioni soprattutto per i livelli di NCS più elevati; infatti sono stati trovati 11 nuovi casi con NCS superiore all' 1.0%, che vanno a sommarsi ai 6 casi già contenuti nel database di Swaisgood.

Anche la caratterizzazione del comportamento sismico delle dighe in terra, che hanno risentito accelerazioni elevate, è stata arricchita mediante l'aggiunta di 6 casi caratterizzati da PGA superiore o uguale a 0.60 g ai 5 già contenuti nel database di Swaisgood.

In Figura 9 viene mostrato il database esteso sovrapposto alla correlazione lineare PGA-NCS proposta da Swaisgood [3]: si osserva che i 41 nuovi casi incrementano la densità lungo il trend lineare proposto da Swaisgood. Al contempo, non si osserva un aumento significativo della dispersione dei dati: calcolando la deviazione standard sul database esteso si ottiene un valore $\sigma = 1.1144$, di poco superiore alla deviazione standard calcolata da Swaisgood sul suo database, pari a $\sigma = 0.9695$.

I 41 nuovi casi vengono mostrati in Figura 10 suddivisi per distribuzione geografica, da cui emerge che la maggior parte dei casi che incrementano il database ai livelli di danno più elevati (es. NCS > 1%) fanno riferimento a terremoti giapponesi e turchi (sequenza turca 2023), che, come si può osservare dalla Tabella 1, sono caratterizzati da valori elevati di magnitudo.

Dalla Figura 10 si osserva altresì che i nuovi dati presentano NCS in molti casi superiori alle stime fornite dalla correlazione di Swaisgood, specie con riferimento agli eventi di magnitudo più elevata: in 13 su 41 nuovi casi (circa il 32%) NCS supera le stime fornite dall'equazione di Swaisgood riferita al livello di magnitudo 9.

Nella Figura 11 il database completo viene mostrato suddiviso in termini di differenti **classi di magnitudo** ($M_w \leq 6.5$, $6.5 < M_w \leq 7.5$, $M_w > 7.5$): si può notare che NCS superiori al 2.5% (soglia per SLC in [15]) in 3 casi su 4 sono riscontrati per magnitudo superiore a 7.5, anche in corrispondenza di elevate distanze epicentrali (es. dighe di Fujinuma e Coiheuco, entrambe con distanza epicentrale superiore a 100 km, vedi Tabella 1). L'importanza dell'effetto della magnitudo, soprattutto nei casi in cui sono stati registrati danni severi, è correlabile all'elevata durata dei terremoti di forte magnitudo, e conseguentemente all'elevato numero di cicli di carico a cui vengono sottoposte le dighe in materiali sciolti in occasione di questi eventi.

Sempre nella medesima Figura 11 si può anche osservare che livelli di NCS > 1% (soglia per SLV in [15]) si riscontrano solo per terremoti con magnitudo superiore a 6.5, circostanza che avvalorata la correlazione tra magnitudo del sisma e livello di danno atteso.

In Figura 11 viene anche mostrata l'Eq. (2) di Swaisgood per quattro differenti livelli di magnitudo. Come notato anche in precedenza, si osserva che l'Eq. (2) appare poco cautelativa per la stima dei cedimenti, specie per i livelli di magnitudo più elevata ($M_w > 6.5$).

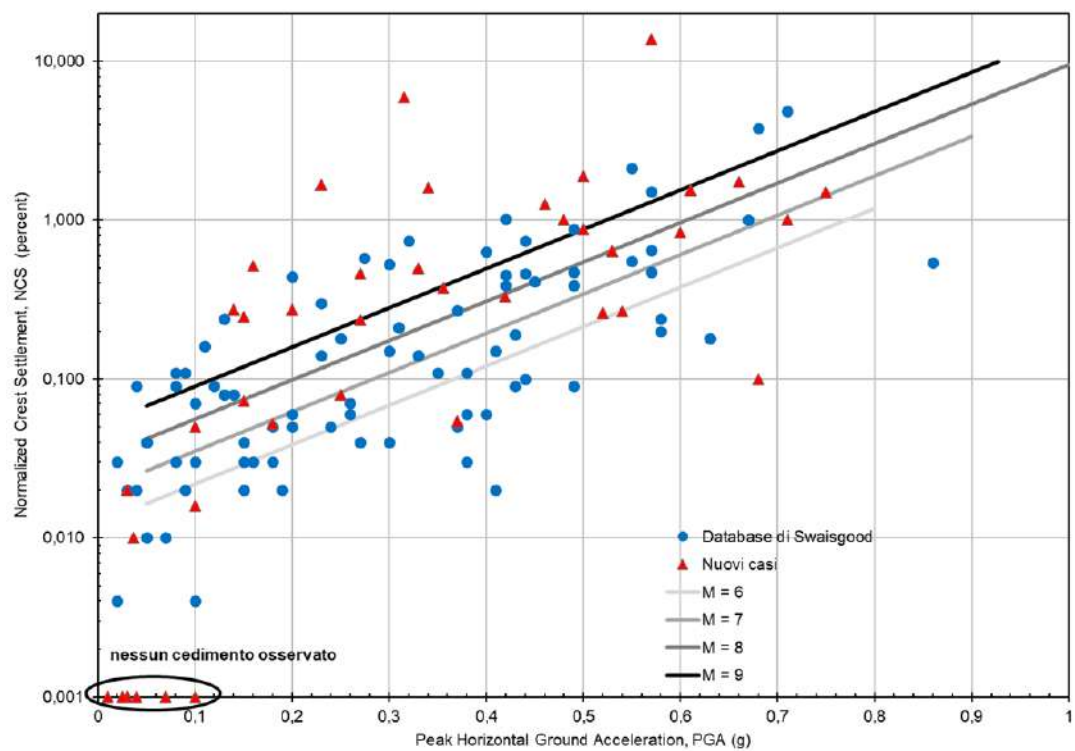


Figura 9 - Equazione di Swaigood sovrapposta al database completo.

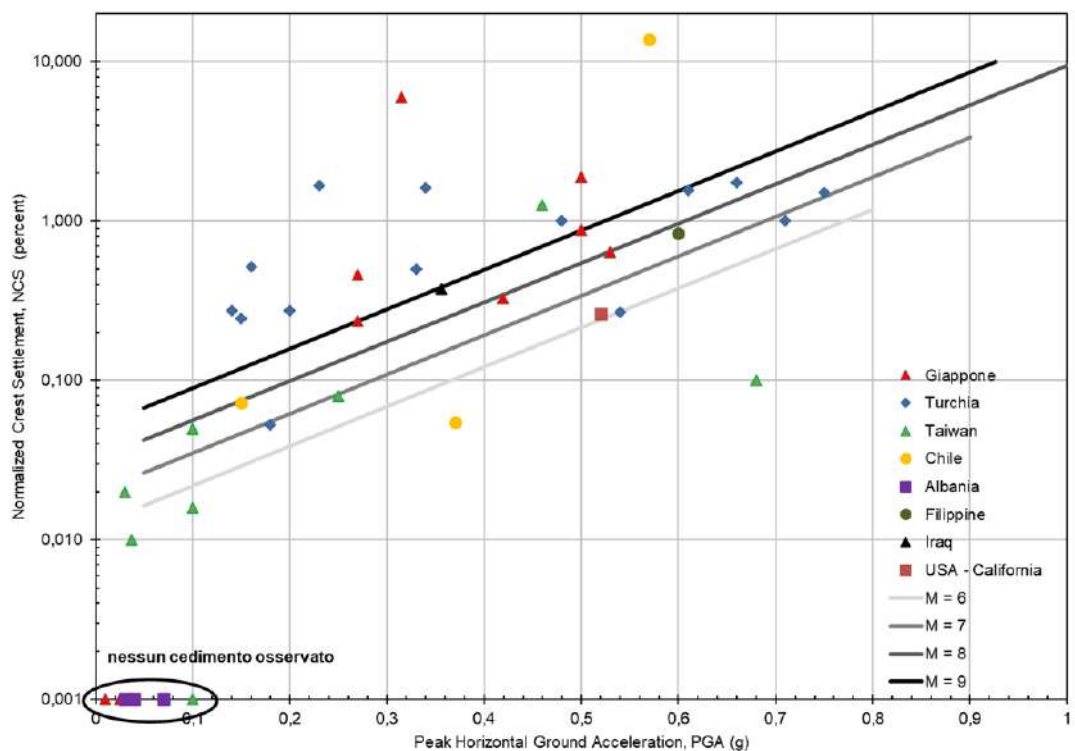


Figura 10 - Distribuzione geografica dei 41 nuovi casi e correlazione di Swaigood.

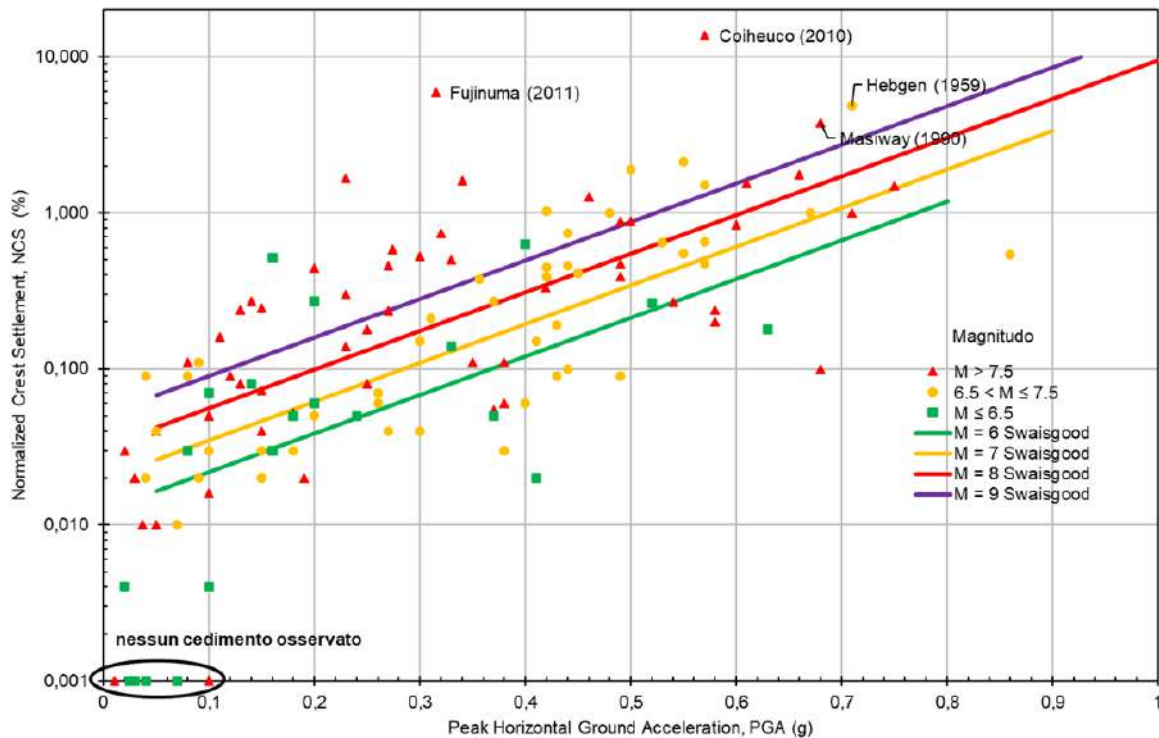


Figura 11 - Correlazione NCS-PGA suddivisa per classi di magnitudo ed equazione di Swaisgood.

Per questa ragione si propone di utilizzare la seguente equazione, rappresentativa dell'84% della distribuzione statistica log-normale, in cui la deviazione standard è quella calcolata sul database esteso ($\sigma = 1.1144$):

$$NCS(\%) = e^{(5.70PGA + 0.471M_w - 7.22 + \sigma)} = e^{(5.70PGA + 0.471M_w - 6.11)} \quad (3)$$

Nelle Figure da 12 a 15 viene mostrata in linea tratteggiata la nuova Eq. (3) all'84% per i diversi livelli di magnitudo considerati ($M_w = 6, 7, 8$ e 9). Nelle stesse figure vengono mostrate in linea continua colorata l'Eq. (2) di Swaisgood e in linea continua nera l'interpolazione dei dati corrispondenti alla relativa fascia di magnitudo con l'equazione associata. Si osserva che l'Eq. (2) di Swaisgood risulta sostanzialmente sovrapponibile alla retta media interpolante i dati (casi $M_w = 6, 7$ e 8). Passando alla retta rappresentativa dell'84% (Eq. (3)), si riscontra che essa inviluppa bene la quasi totalità dei dati osservati, fatta eccezione per alcuni casi singolari (outliers).

Per il livello di magnitudo 6 (vedi Figura 12) si osserva il caso peculiare della diga di Cat, facente parte della sequenza sismica turca del 2023: la PGA stimata al sito, pari a $0.16g$, è associata ad un aftershock ravvicinato di $M_w = 6$ (vedi Tabella 1). La diga è comunque stata sottoposta all'intera sequenza sismica (mainshock $M_w = 7.8$), pertanto il cedimento osservato è verosimilmente associato ad un danno cumulato dal risentimento di più terremoti, piuttosto che causato dal singolo evento sismico.

Considerazioni analoghe possono essere fatte anche per i due outliers di Reyhanli e Ariklikas, osservati per il livello di magnitudo 8 (Figura 14): anche questi due sbarramenti sono stati soggetti all'intera sequenza sismica turca del 2023, ed i cedimenti osservati sono probabilmente associati ad un danno cumulato.

Per il livello di magnitudo 7 (Figura 13) si evidenziano invece 4 outliers rispetto all'Eq. (3), tutti riferiti ad eventi sismici occorsi a distanze molto ravvicinate rispetto ai siti degli sbarramenti (in zona epicentrale, vedi distanze epicentrali in Tabella 1): si tratta dei casi di Hebgen (terremoto di Yellowstone del 1959, $M_w = 7.2$), di Upper San Fernando (terremoti di San Fernando del 1971, $M_w = 6.6$, e Northridge del 1994, $M_w = 6.7$) e di Shin-Yamamoto (sisma di Niigata del 2004, $M_w = 6.6$). In questi quattro casi, caratterizzati da valori di PGA > 0.4g, i cedimenti elevati riscontrati sulle dighe sono verosimilmente stati amplificati da effetti di campo vicino (near field), quali ad esempio la direttività del moto sismico, l'importante componente verticale, gli effetti di fagliazione superficiale a breve distanza etc.

Per il livello di magnitudo 9 (Figura 15) i due outliers osservati rispetto alla nuova Eq. (3) fanno riferimento ai due eventi di Fujinuma e Coiheuco, in cui si è verificato il superamento della soglia di SLC.

In Figura 16 viene mostrata la nuova Eq. (3) proposta per quattro differenti livelli di magnitudo, sovrapposta al database completo suddiviso per classi di magnitudo.

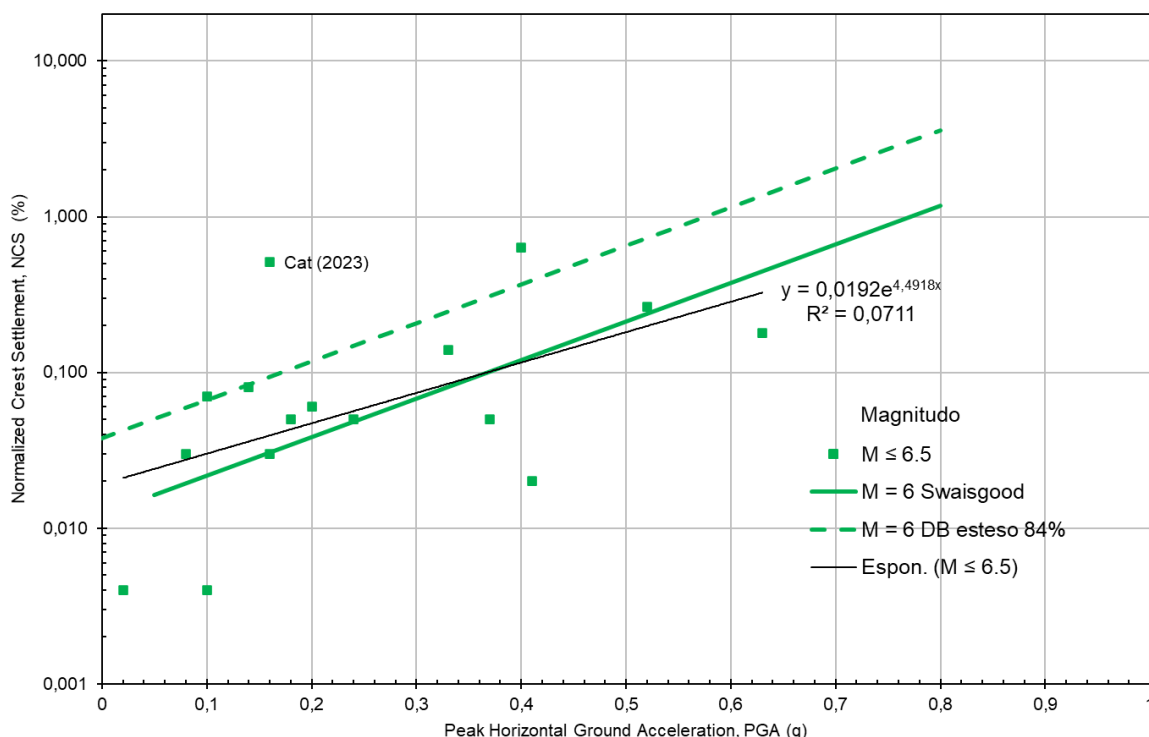


Figura 12 - Nuova correlazione NCS-PGA all'84% (linea tratteggiata), per $M_w = 6$.

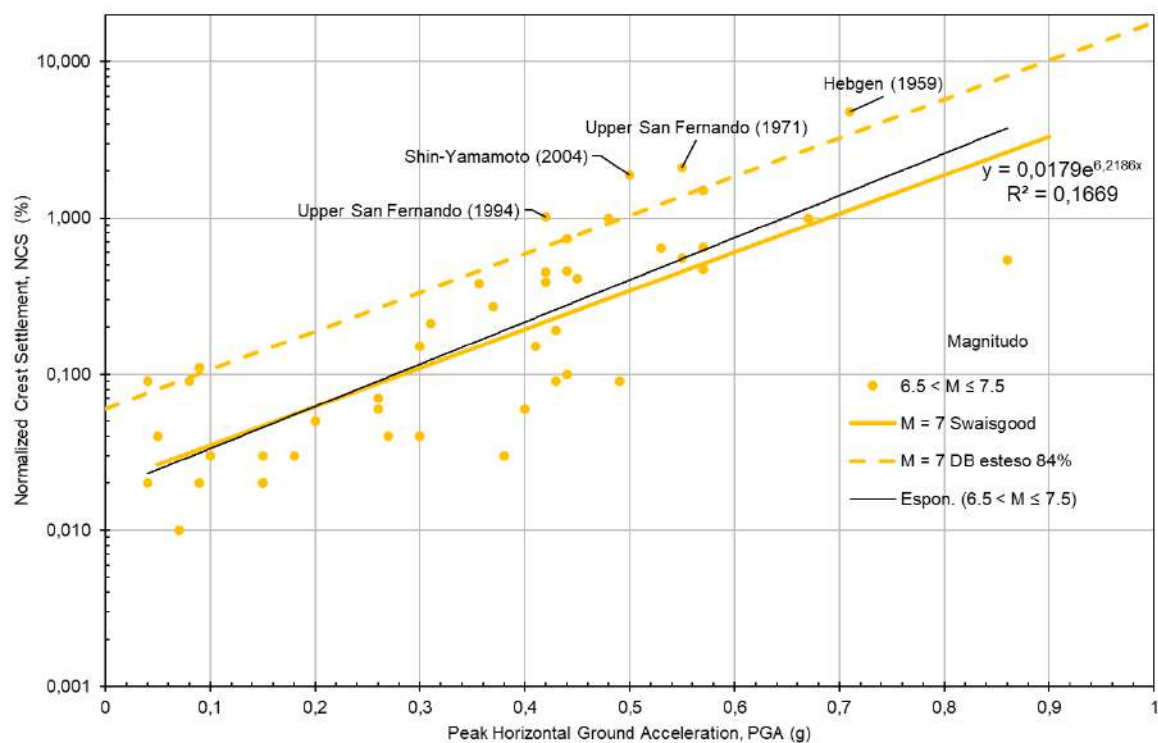


Figura 13 - Nuova correlazione NCS-PGA all'84% (linea tratteggiata), per Mw = 7.

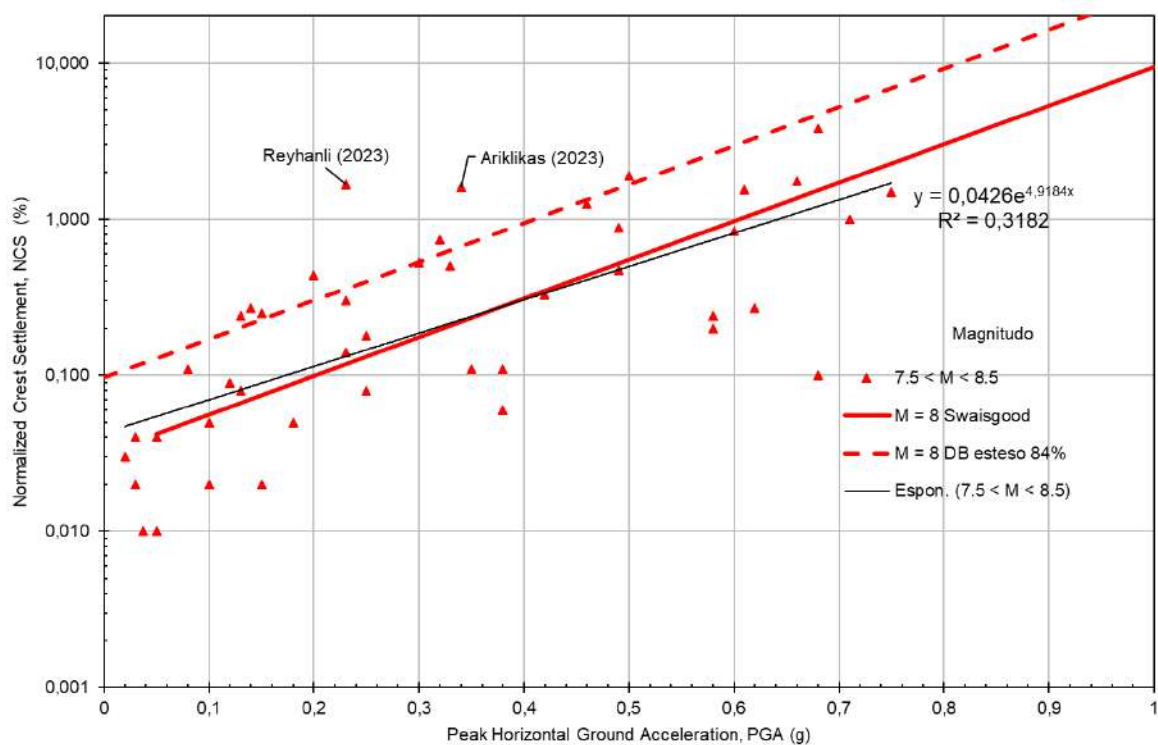


Figura 14 - Nuova correlazione NCS-PGA all'84% (linea tratteggiata), per Mw = 8.

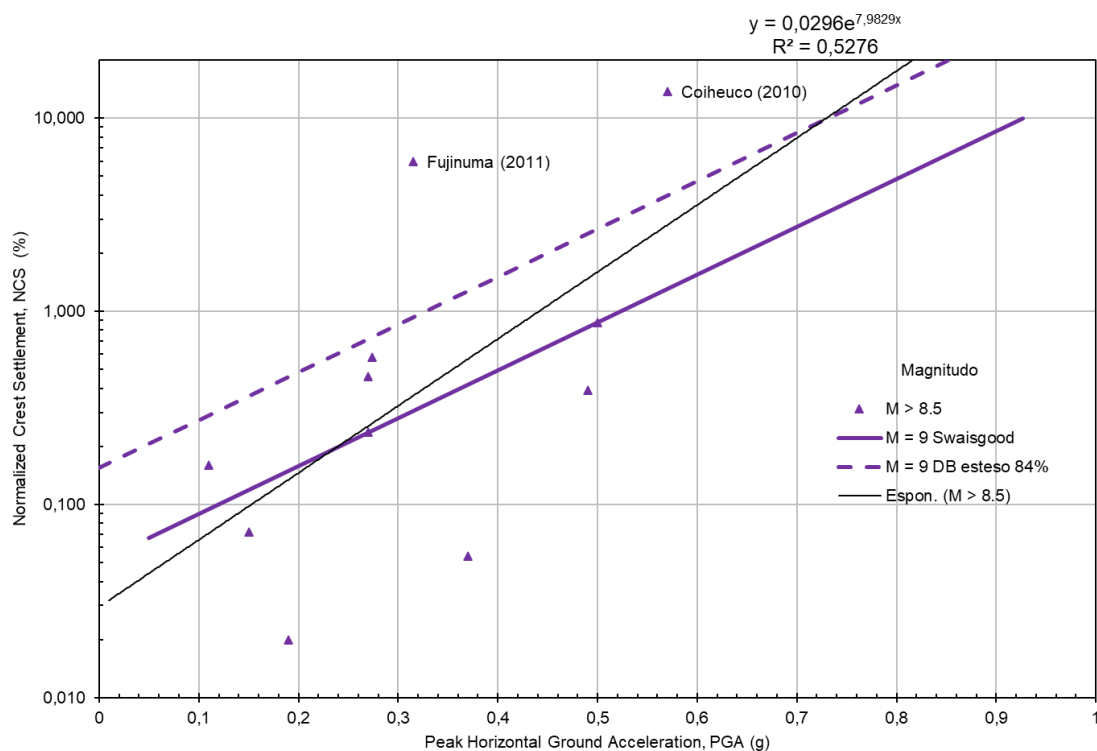


Figura 15 - Nuova correlazione NCS-PGA all'84% (linea tratteggiata), per Mw = 9.

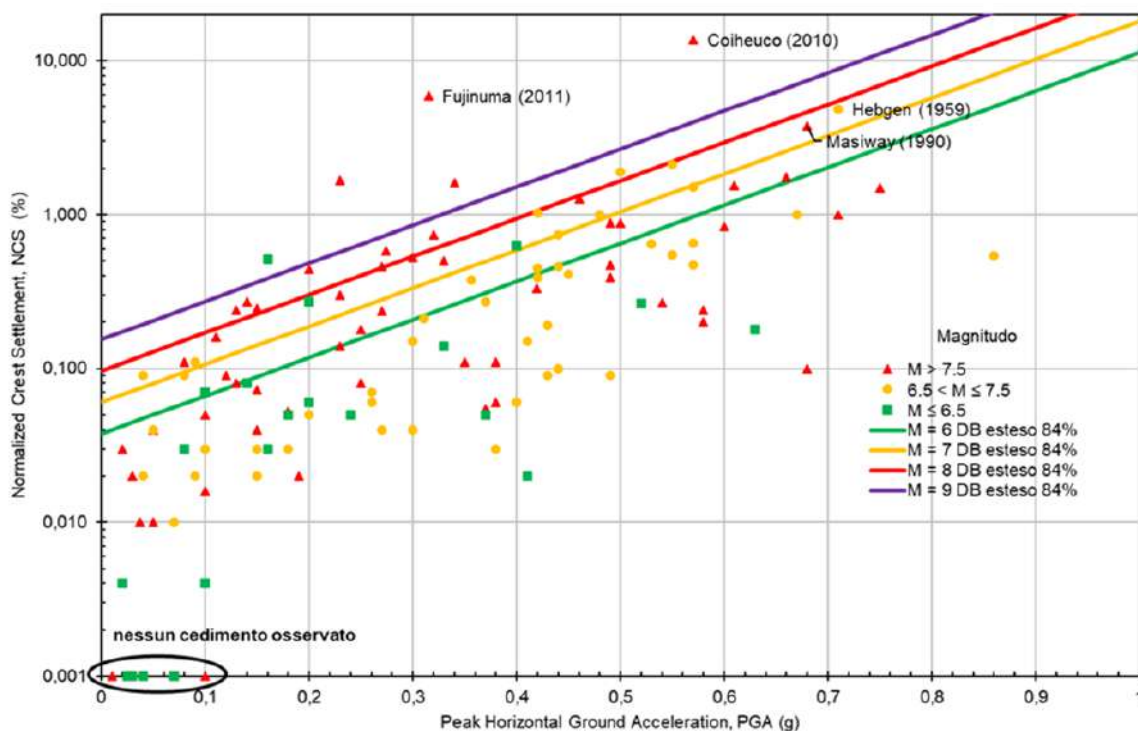


Figura 16 - Nuova equazione proposta per la stima di NCS, suddivisa per classi di magnitudo.

Dalle rette mostrate in Figura 16 è possibile estrapolare i valori di PGA cui corrispondono i superamenti dei vari stati limite, dato un valore di magnitudo del sisma: ad esempio per un sisma di

magnitudo $M_w = 7.0$ il superamento dello SLV ($NCS > 1\%$) è stimato avvenire per $PGA > 0.50g$, mentre il superamento dello SLC ($NCS > 2.5\%$) è previsto per $PGA > 0.65g$.

Allo stesso modo per un sisma di magnitudo $M_w = 6.0$ il superamento dello SLV ($NCS > 1\%$) è previsto per $PGA > 0.57g$, mentre il superamento dello SLC ($NCS > 2.5\%$) per $PGA > 0.73g$. Per un sisma di magnitudo $M_w = 8.0$ il superamento dello SLV ($NCS > 1\%$) è previsto per $PGA > 0.40g$, mentre il superamento dello SLC ($NCS > 2.5\%$) per $PGA > 0.57g$. Infine, per un sisma di magnitudo $M_w = 9.0$ il superamento dello SLV ($NCS > 1\%$) è previsto per $PGA > 0.32g$, mentre il superamento dello SLC ($NCS > 2.5\%$) per $PGA > 0.48g$.

In Figura 17 sono rappresentati i **dati accorpati per Stato Limite raggiunto**. E' possibile osservare come le dighe in terra abbiano resistito ad accelerazioni fino a **0.20 g** senza subire danneggiamenti (assenza di danno o superamento soglia SLO) e senza superare la soglia di SLD. Unico outlier è il caso della diga di Cat in Turchia ($M_w=6.0$), che ha subito l'intera sequenza sismica del 2023 e il danno potrebbe rappresentare un effetto cumulato di più eventi sismici.

Il valore di PGA pari a **0.30 g** rappresenta invece il limite inferiore per il superamento della soglia di SLV/SLC (il che conferma quanto indicato dalle rette previsionali di Eq. (3) riportate nella precedente Fig. 16). Anche in questo caso l'unico outlier è rappresentato dal caso di una diga turca (Reyhanli).

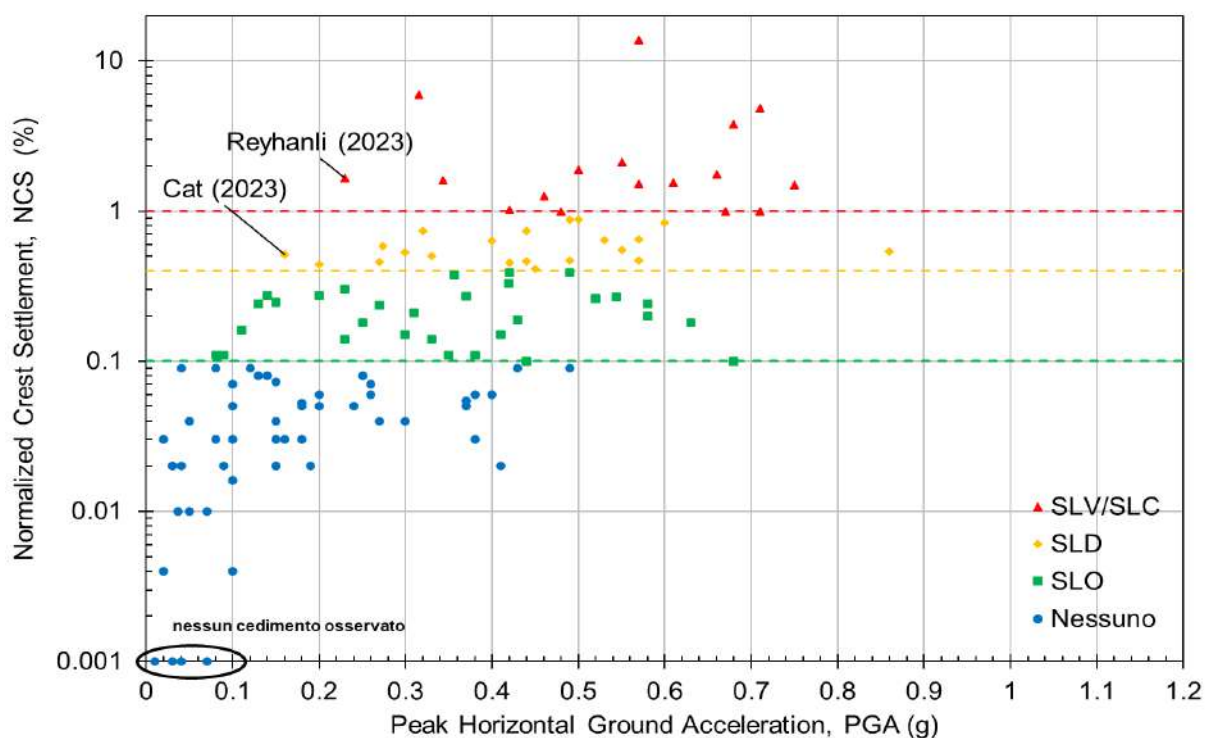


Figura 17 - Dati accorpati per Stato Limite raggiunto.

Il comportamento osservato per bassi valori di PGA risulta essere in accordo con lo studio presentato da Arredi [1].

Analizzando i dati del database esteso, riportato dalla Tabella 1 alla Tabella 3, è possibile osservare che circa il 45.0% delle dighe non ha riportato danni visibili, il 24.0% ha superato lo stato limite di operatività (SLO), il 17.0% ha superato lo SLD e il 14% ha superato lo stato limite ultimo SLV/SLC. Il valore assoluto del cedimento in cresta associato all'insorgenza di SLD varia tra 0.08m e 1.10m (con valor medio pari a 0.34m) mentre per SLV/SLC il cedimento è variabile tra 0.27 m e 4.0 m (media 0.92m); i cedimenti associati al superamento della soglia di SLV sono risultati circa 3 volte superiori a quelli di SLD (vedi Tabella 6).

Tabella 6 - Valori massimi, minimi e medi dei cedimenti associati al superamento delle soglie di SLD e SLV/SLC.

Cedimento in cresta [m]		
	SLD	SLV/SLC
Min.	0.08	0.27
Max.	1.10	4.0
Media	0.34	0.92

I dati sono stati accorpati anche per **tipologia costruttiva**. Le dighe sono state classificate in 4 tipologie seguendo la classificazione proposta da Swaisgood:

- CFRD: Concrete Face Rockfill dam;
- ECRD: Earth Core Rockfill dam;
- HF: Hydraulic fill;
- E: Earthfill. Per semplicità sono state inserite in questa categoria anche le dighe che hanno una classificazione di tipo misto come E+HF (3 casi), E+ECRC (1 caso).

Nelle Tabelle 7-8 sono riportati, per ciascuna tipologia costruttiva e per ciascuno Stato Limite, il numero dei casi di superamenti delle rispettive soglie mentre in Figura 18 i valori di NCS (%) sono stati accorpati per tipologia costruttiva. L'esame dei dati tabulati e dei cedimenti permette le seguenti considerazioni:

- Le dighe di tipo “CFRD” sono risultate le meno vulnerabili presentando:
 - 7 casi con nessun danno su totale di 55 casi;
 - 4 casi di superamento della soglia di SLD (NCS=0.4%) su 21 totali;
 - 1 solo caso di raggiungimento della soglia di SLV (NCS=1%) su 13 totali. E' il caso della diga di Ishibuchi (Giappone) con NCS = 1% che ha subito il sisma di Iwate-Miyagi (2008) in condizioni di near field.
- Le dighe in terra di tipo “E” sono risultate essere le più vulnerabili presentando:
 - 7 casi di superamento della soglia di SLV (NCS=1%);

- 3 casi di superamento della soglia di SLC (NCS=2.5%) su 4 totali.

Tabella 7 - Superamenti delle soglie di Stato Limite in funzione della tipologia costruttiva. Dati espressi in valore assoluto.

	TOT	CFRD	ECRD	HF	E
Nessuno	55	7	25	2	21
SLO	30	2	15	1	12
SLD	21	4	6	1	10
SLV	13	1	3	2	7
SLC	4	0	1	0	3
TOT.	123	14	50	6	53

Tabella 8 - Superamenti delle soglie di Stato Limite in funzione della tipologia costruttiva. Dati espressi in % sui casi di superamento di ciascuno SL.

	CFRD	ECRD	HF	E
Nessuno	13%	45%	4%	38%
SLO	7%	50%	3%	40%
SLD	19%	29%	5%	48%
SLV	8%	23%	15%	54%
SLC	0%	25%	0%	75%

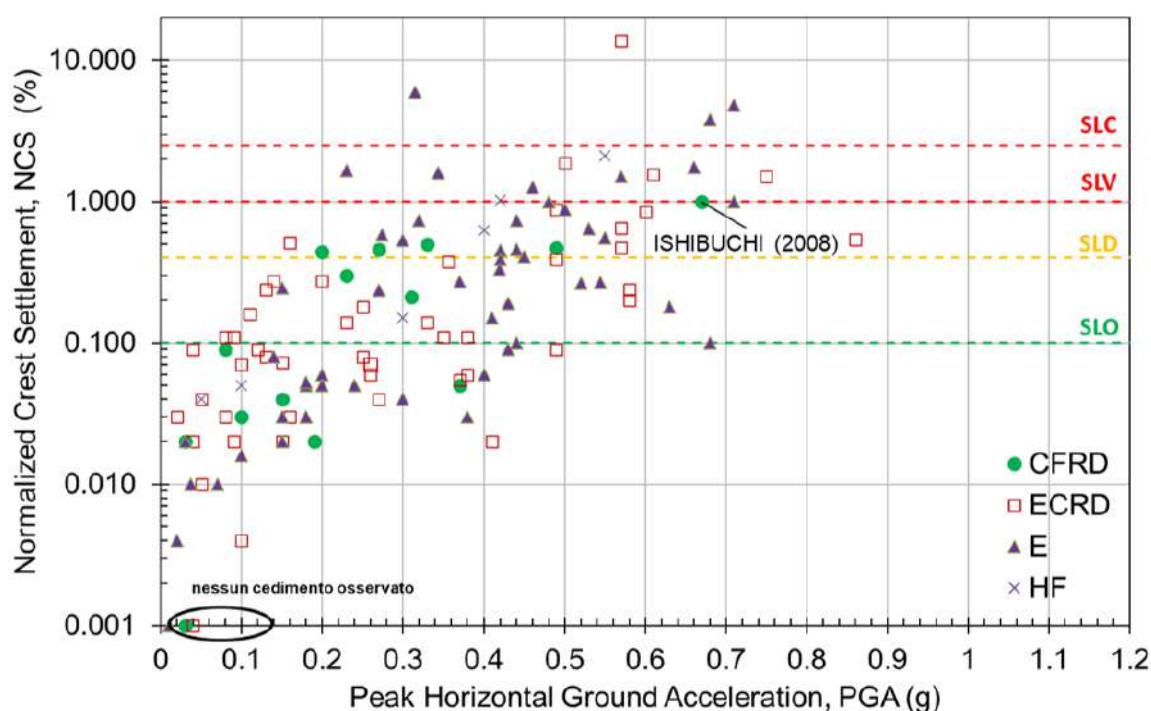


Figura 18 - Valori di NCS (%) accorpati per tipologia costruttiva.

La risposta sismica delle dighe in terra è stata analizzata anche in funzione della **distanza epicentrale**. L'attenuazione del moto del suolo dalla sorgente sismica al sito (GMPE) e l'attenuazione dell'intensità risentita (IPE) sono infatti fenomeni ampiamente documentati nella letteratura tecnica di riferimento.

In Figura 19 è rappresentato l'andamento dei valori della distanza epicentrale in funzione della PGA registrata per tutti i casi analizzati. Provando ad aggregare i dati in funzione delle classi di magnitudo si può osservare quanto segue:

- tutte le curve di regressione dei dati relativi ad eventi con $M_w < 7.5$ convergono su un'unica curva (linea blu, Figura 19);
- la curva di regressione dei dati relativi ad eventi con $M_w \geq 7.5$ (curva rossa, Figura 19) presenta andamento qualitativamente simile a quella per $M_w < 7.5$ ma risulta traslata verso le ordinate maggiori. Questo conferma che terremoti di elevatissima magnitudo possono determinare risentimenti sismici significativi (valori di PGA $> 0.3-0.4g$) anche per distanze molto elevate ($> 50-100$ km).

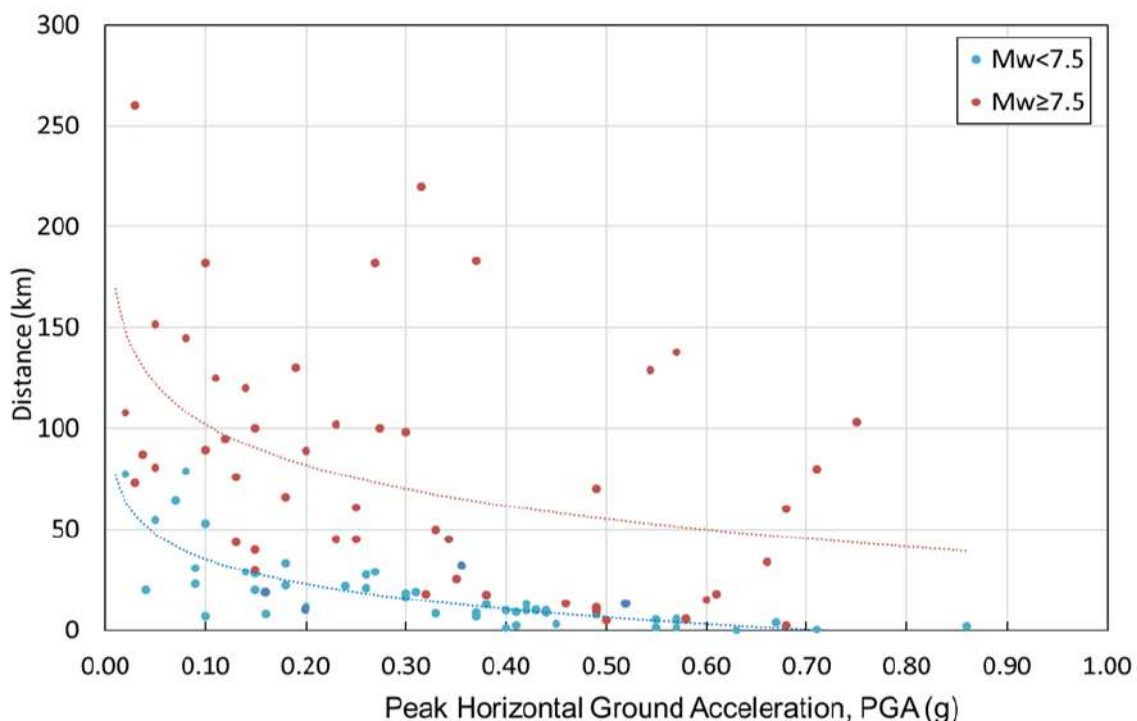


Figura 19 - Distanza epicentrale in funzione della PGA. Dati accorpati in funzione della magnitudo.

In Figura 20 è rappresentata la distribuzione dei valori di distanza epicentrale in funzione della PGA per i soli eventi sismici caratterizzati da $M_w < 7.5$. Il coefficiente di determinazione R^2 è mediamente buono/discreto. Aggregando i dati del cedimento normalizzato NCS (%) in funzione della PGA e della distanza epicentrale solo per terremoti con $M_w < 7.5$, in Figura 21 si osserva che i danneggiamenti più severi si rilevano generalmente per eventi sismici a distanze epicentrali modeste (near field, $D < 20$ km) caratterizzati da elevati valori di PGA, mentre i valori più bassi di NCS (%) si rilevano generalmente per terremoti con $D > 50$ km e bassi valori di PGA.

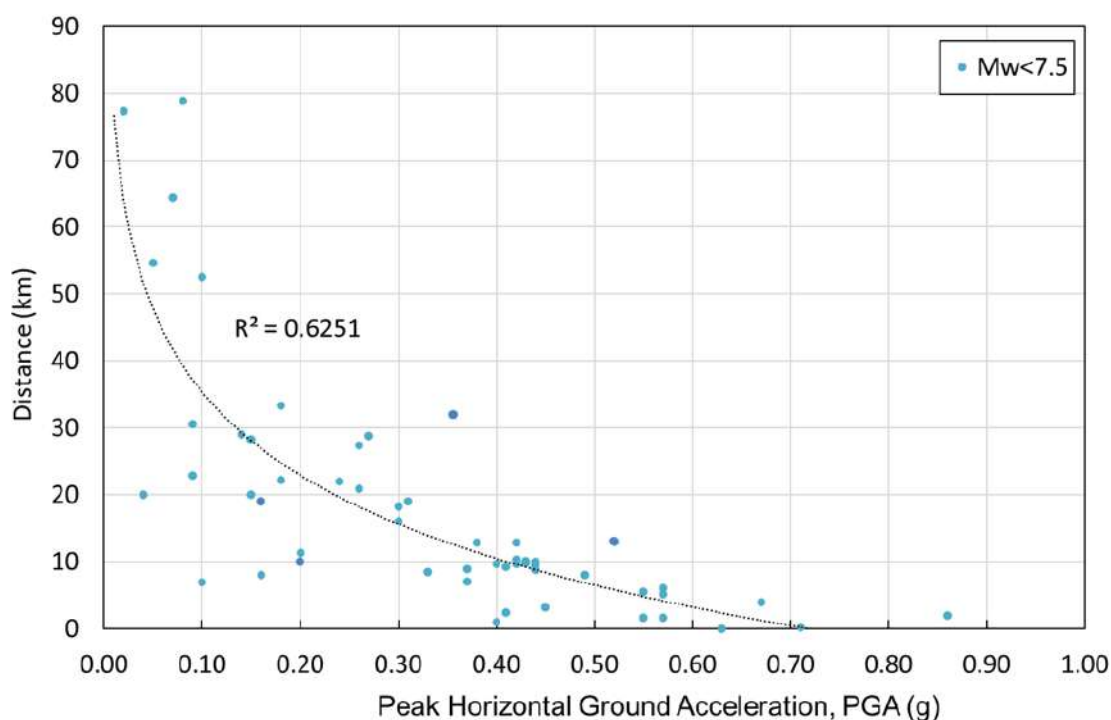


Figura 20 - Distanza epicentrale in funzione della PGA. Dati relativi a terremoti con $M_w < 7.5$.

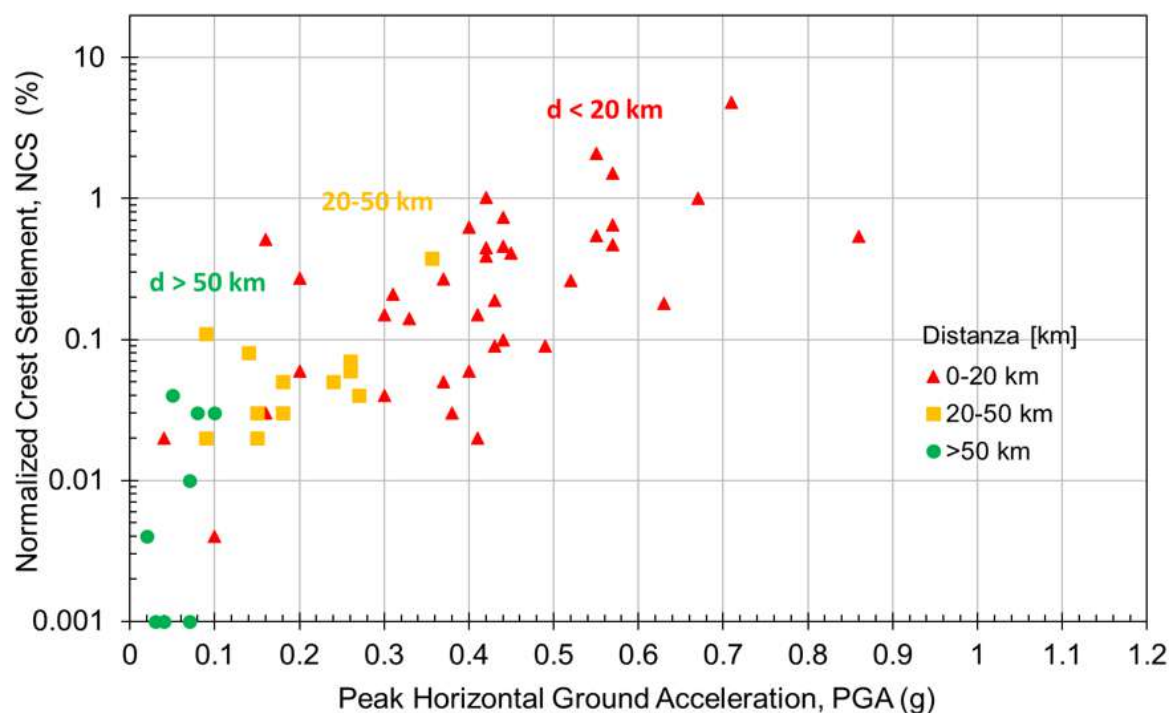


Figura 21 - Cedimenti in cresta normalizzati (NCS, %) in funzione della PGA, aggregati per distanza epicentrale [km]. Dati relativi a terremoti con $M_w < 7.5$.

È evidente, pertanto, che non solo la Magnitudo (M_w) ma anche la distanza epicentrale (D) e, in particolare, la combinazione delle due grandezze (M_w - D), è risultata determinante nella risposta sismica degli sbarramenti. Osservando i dati di M_w e D per i casi con $NCS \geq 1\%$ (soglia SLV, Tabella 9) risulta evidente che gli effetti più severi si rilevano per:

- terremoti con Mw molto elevate ($M_w > 7.5$), indipendentemente dalla distanza. Questo per effetto dell'elevato numero di cicli di carico subiti;
- terremoti con $6.5 < M_w < 7.5$ solo a brevi distanze (near field, $D < 20$ km). Questo per effetto degli elevati valori di PGA risentita (superiore a 0.4g).

Tabella 9 - Selezione di casi caratterizzati da valori di $NCS \geq 1\%$ (soglia SLV).

ID No.	General Information						Earthquake Data				Crest Settlement	
	Dam Name	Location	Year Built	Dam Type	Crest Length	Dam Height	Date	Moment Magnitude	Epicentral Distance	Peak Ground Acceleration		
					CL	DH			D	PGA		
					[m]	[m]				[g]	Sett	NCS
89	Coihueco dam	Chile	1974-1960	ECRD	1040	29	27-feb-2010	8.8	138.0	0.57	4.00	13.79
92	Fujinuma	Japan	1949	E	133.2	18.5	11-mar-2011	9.0	220.0	0.32	1.10	5.95
7	Hebgen (1959)	Montana	1914	E	213	25	17-ago-1959	7.2	0.2	0.71	1.69	4.82
46	Masway (1990)	Philippines	1977	E	427	25	16-lug-1990	7.7	2.7	0.68	1.06	3.79
11	U. SAN FERNANDO	California	1921	HF	390	25	9-feb-1971	6.6	1.6	0.55	0.91	2.11
74	ISHIBUCHI	Japan	1953	CFRD	271	54	8-giu-2008	6.9	4.0	0.67	0.55	1.00
91	SHIN-YAMAMOTO	Japan	1954	ECRD	1392	42.4	23-ott-2004	6.6	5.0	0.50	0.80	1.89
104	Kartalkaya	Turchia	1972	E-HF	-	57	6-feb-2023	7.8	34.0	0.66	1.00	1.75
105	Reyhanli	Turchia	2020	E-ECRD	9271	30	6-feb-2023	7.8	102.0	0.23	0.50	1.67
102	Ariklikas	Turchia	1998	E	355	33	6-feb-2023	7.8	45.0	0.343	0.53	1.61
101	Sultansuyu	Turchia	1993	E	721	60	6-feb-2023	7.5	83.0	0.48	0.60	1.00
111	Nurdagi-Hamidiye	Turchia	2018	ECRD	182	29	6-feb-2023	7.8	16.0	0.61	0.45	1.55
34	AUSTRIAN	California	1950	E	213	56	17-ott-1989	7.1	1.6	0.57	0.85	1.51
110	Kirikhan-Kutlusoguksu	Turchia	2017	ECRD	419	40	6-feb-2023	7.8	103.0	0.75	0.60	1.50
109	Hassa-Demrek	Turchia	2006	E	503	30	6-feb-2023	7.8	80.0	0.71	0.30	1.00
120	Tousheh (Shuishe)	Taiwan	-	E	-	21.8	21-set-1999	7.6	13.0	0.46	0.27	1.26
59	U. SAN FERNANDO	California	1921	HF	390	25	17-gen-1994	6.7	10.3	0.42	0.44	1.02

Ulteriori considerazioni sul comportamento osservato delle dighe in terra

Nel seguito sono analizzati in modo sintetico gli effetti dei terremoti relativi alle quattro dighe in terra che, secondo la classificazione adottata, hanno raggiunto e superato la soglia associata allo Stato Limite di Collasso ($NCS=2.5\%$).

- Diga di Fujinuma (Giappone). Terremoto di Tohoku del 11/03/2011, $M_w 9.0$, $D=220$ km, $PGA=0.32$ g.

La diga di Fujinuma originaria era una diga in terra zonata di altezza pari a 18.5 m, costruita nel 1949 e con sviluppo del coronamento per 133 m. Durante l'evento sismico il serbatoio era pieno. La diga ha subito un collasso completo.

L'ipotesi più accreditata è la rottura lungo il rinfiando di valle per effetto della presenza di strati di terreno organico in fondazione². I cedimenti hanno consentito, inizialmente, un lento rilascio di acqua al di sopra della cresta dello sbarramento e la tracimazione ha causato erosione progressiva che è culminata in una breccia improvvisa con **rilascio incontrollato di acqua**. L'entità del cedimento in cresta che ha causato la tracimazione, pari a circa 1.10m, è stata stimata attraverso modellazione numerica.

- Diga di Hebgen (USA). Terremoto di Yellowstone 17/08/1959. $M_w 7.2$, $D=0.2$ km, $PGA=0.7$ g.

² Ciò sembra suggerire che la fondazione della diga non sia stata preparata adeguatamente.

La diga, costruita nel 1914, è alta circa 27 m e presenta nucleo in calcestruzzo. Durante l'evento sismico il serbatoio era pieno ($\sim 450 \text{ Mm}^3$). Il terremoto ha determinato la formazione di due piani di faglia principali (Red Canyon scarp ed Hebgen scarp) con rigetti di ordine metrico provocando un significativo abbassamento uniforme della fondazione rocciosa dello sbarramento ($\approx 2.95 \text{ m}$) con formazione di moto ondoso nel serbatoio durato circa 12 ore che ha portato alla tracimazione dello sbarramento (non risultato tuttavia essere compromettente per la sicurezza). Nonostante l'assenza di collasso, la diga di Hebgen ha subito danni strutturali rilevanti, principalmente riconducibili a deformazioni permanenti del nucleo in calcestruzzo (rotazione massima in cresta di circa 25 cm sviluppata con effetto arco a partire dalla spalla destra per circa 120 m verso la mezzeria dello sbarramento) e cedimenti differenziali dell'argine (fino a 1.8 m) dovuti essenzialmente alla compattazione dei materiali saturi e con maggiore contenuto a grana fine del rinfiato di monte. I cedimenti del rinfiato di valle non hanno superato 60 cm.

Il comportamento globale dell'opera è stato caratterizzato da assenza di meccanismi di collasso globale e deformazioni distribuite (lateral spreading) pur mantenendo la funzionalità strutturale del nucleo in calcestruzzo. Il sistema di scarico ha rappresentato il punto di maggiore vulnerabilità: lo sfioratore ha subito danni strutturali severi, con dislocazioni, rottura della soletta e perdita di funzionalità. **La diga ha subito ingenti danni ma senza rilascio incontrollato d'acqua.**

- **Diga di Masiway (Filippine). Terremoto del 16/07/1990 M w 7.7, D < 20 km, PGA=0.65 g.**

La diga, di altezza massima pari a circa 25m, ha subito spostamenti orizzontali dell'ordine di 2 m e cedimenti superiori a 1 m. Sono state osservate fessure parallele all'asse della diga, con profondità massima di circa 1.5 m. Sul rinfiato di monte sono presenti fessure più profonde, comprese tra 1.0 e 3.3 m; inoltre, diverse cavità formatesi hanno evidenziato uno scorrimento lungo il contatto tra rinfiato e nucleo.

La differenza di comportamento tra il rinfiato di monte e quello di valle suggerisce la probabile presenza di fenomeni di liquefazione nella zona di monte.

A seguito del terremoto, il livello d'invaso è stato progressivamente abbassato con un rateo di circa 10 cm al giorno. Durante il sisma il livello d'invaso si trovava a -7m dalla quota di coronamento. **La diga ha subito ingenti danni ma senza rilascio incontrollato d'acqua.**

- **Diga di Coihueco, Cile. Terremoto di Maule del 27/02/2010. Me 8.8, D= 138 km, PGA=0.57 g.**

La diga di Coihueco, di altezza pari a circa 29 m, è una diga in terra zonata costruita tra il 1964 e il 1970, con sviluppo del coronamento di 1040 m. I principali effetti osservati durante il terremoto di Maule sono stati:

- Instabilità del paramento di monte: si è verificato un cedimento parziale del rinfiango di monte (scorrimento).
- Grandi deformazioni: le deformazioni indotte sono state rilevanti, con spostamenti verticali fino a circa 4 m, soprattutto in prossimità della spalla sinistra.
- Fessurazioni diffuse: il movimento del corpo diga ha prodotto fessure e deformazioni nel rilevato, in particolare nella zona interessata dallo scorrimento del rinfiango.
- Evidenze di liquefazione: è stata osservata la presenza di materiale sabbioso al piede del rinfiango di monte, indicativo di fenomeni di liquefazione nei terreni di fondazione o nel rilevato.

La fondazione è costituita da strati eterogenei (ghiaie sabbiose, limi e argille), che hanno contribuito alla riduzione della stabilità durante l'evento sismico. Analisi di stabilità pseudo-statiche hanno mostrato che, per accelerazioni sismiche compatibili con l'evento, il fattore di sicurezza scende a valori prossimi o inferiori a 1, coerentemente con i danni registrati. Anche in questo caso, **la diga ha subito ingenti danni ma senza rilascio incontrollato d'acqua.**

Analizzando i 4 casi di letteratura che presentano superamenti della soglia definita per SLC si può osservare che solamente in un caso (diga di Fujinuma) è avvenuto un collasso vero e proprio dello sbarramento con rilascio incontrollato d'acqua. In tutti gli altri casi le dighe hanno evidenziato un comportamento di tipo "duttile", essendo in grado di assorbire elevate deformazioni senza giungere ad una rottura del sistema diga-fondazione e rilascio d'acqua invasata.

Il valore di soglia individuato per il raggiungimento dello stato Limite di Collasso delle dighe in terra, pari a $NCS=2.5\%$, appare pertanto un limite sufficientemente conservativo.

4. CONCLUSIONI

In questo bollettino sono stati presentati i risultati dell'attività svolta dal gruppo di lavoro ITCOLD denominato "Comportamento sismico delle dighe in materiali sciolti: case histories in altri Paesi" focalizzata sulle dighe in materiali sciolti.

Dopo aver creato un database di casi significativi a livello mondiale di dighe in materiali sciolti soggette a sisma, esteso ed aggiornato rispetto a quello già disponibile in letteratura, si sono cercate correlazioni tra il danno osservato e le caratteristiche dell'evento sismico.

E' stata osservata una stretta correlazione tra la magnitudo del terremoto ed il livello di danneggiamento rilevato, rappresentato dal cedimento normalizzato in cresta ($NCS, \%$): valori di $NCS \geq 1\%$, identificato come soglia per il raggiungimento dello SLV, sono stati osservati solo per terremoti con $M_w > 6.5$. Ciò indica che, per il danneggiamento delle dighe in materiali sciolti, la durata significativa del sisma, strettamente dipendente dalla magnitudo del terremoto, è un parametro determinante:

terremoti di magnitudo elevata sono caratterizzati da lunghe durate significative, e quindi da un elevato numero di cicli di carico cui viene sottoposta la struttura.

È stato altresì osservato un effetto combinato magnitudo-distanza: i danni maggiori (corrispondenti a $NCS \geq 1\%$) si riscontrano o per magnitudo elevate ($M_w > 7.5$) caratterizzati da elevata durata significativa, indipendentemente dalla distanza epicentrale, oppure per terremoti con $6.5 < M_w < 7.5$ solo per ridotte distanze epicentrali (condizioni di near field, $D < 20$ km) e PGA elevate ($> 0.4g$).

Al fine di stimare in modo più cautelativo il livello di danno in termini di cedimento in cresta normalizzato NCS, dipendente dai due parametri sismici M_w e PGA, è stato proposto di utilizzare l'equazione di Swaisgood modificata inserendo la deviazione standard σ , ricalcolata sul database esteso ($\sigma = 1.1144$).

Questa equazione previsionale aggiornata all'84esimo percentile può essere utilizzata anche per definire le soglie di superamento dei vari stati limite in termini di PGA, dato un valore di magnitudo M_w dell'evento sismico. Dette soglie ben si sposano con quanto si riscontra dai dati analizzati: il valore di PGA pari a $0.20g$ può essere considerato come un limite inferiore per l'insorgenza dello SLD, mentre il limite inferiore per l'insorgenza dei due stati limite ultimi (SLV/SLC) risulta pari a $0.30g$.

Aggregando i dati con riferimento allo stato limite raggiunto, è possibile osservare che circa il 45% delle dighe non ha riportato danni visibili, il 24% ha superato lo stato limite di operatività (SLO), il 17% ha superato lo SLD e il 14% ha superato lo stato limite ultimo SLV/SLC (in soli 4 casi, pari a circa il 3% del totale, è stato superato lo SLC). I cedimenti associati al superamento della soglia di SLV (valor medio $0.92m$) sono risultati circa 3 volte superiori a quelli di SLD ($0.34m$).

Analizzando i dati da un punto di vista della tipologia costruttiva si è osservato che le dighe in terra omogenee (tipo E) risultano essere la tipologia più vulnerabile (in 10 casi su 17 totali è stata superata la soglia dello SLV), mentre le dighe di tipo CFRD risultano essere quelle sismicamente meno vulnerabili (1 solo caso ha raggiunto lo SLV sui 17 totali).

Sono stati infine approfonditi i 4 casi di letteratura che hanno presentato superamenti della soglia definita per SLC ($NCS \geq 2.5\%$): è stato osservato che di fatto solamente in un caso (diga di Fujinuma) è avvenuto un collasso dello sbarramento con rilascio incontrollato d'acqua. In tutti gli altri casi le dighe hanno evidenziato un comportamento di tipo "duttile", dimostrando di essere in grado di assorbire elevate deformazioni senza giungere ad una rottura improvvisa del sistema diga-fondazione, che comportasse rilascio incontrollato d'acqua.

Il valore di soglia individuato per il raggiungimento dello Stato Limite di Collasso delle dighe in terra, pari a $NCS = 2.5\%$, appare pertanto essere un limite sufficientemente conservativo.

Per le ragioni sopra esposte si può concludere che le dighe in materiali sciolti hanno storicamente mostrato un buon comportamento rispetto alle sollecitazioni sismiche, anche di livello estremo: in

assenza di difetti costruttivi all'origine, non sono finora stati osservati casi di collasso completo di queste strutture che abbiano comportato un rilascio incontrollato di acqua a valle.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Arredi, F., Memorie Scelte, Volume II, 2009.
- [2] Swaisgood, J.R., Earth dam deformations caused by earthquakes, Pacific Conference on Earthquake Engineering, Paper number 14, 1-8, 2003.
- [3] Swaisgood, J.R., Behaviour of earth dams during earthquake, The Journal of Dam Safety 12, 1-10, 2014.
- [4] United States Committee on Large Dams (USCOLD), Observed Performance of Dams during Earthquakes, Volume III, 2014.
- [5] Ministry of Infrastructure and Transport, Ministerial Decree 26-06-2014, Standards techniques for the design and construction of retention structures (dams and weirs), 2014.
- [6] United States Committee on Large Dams (USCOLD), Observed Performance of Dams During Earthquakes, Volume II, 2000.
- [7] Huang, B., Li, Q., Wang, R., Hazard and seismic reinforcement analysis for typical large dams following the Wenchuan earthquake, Engineering Geology 194, 86–97, 2015.
- [8] Bray, J., Elderidge, T., Frost, D., Hashash, Y., Kayen, R., Ledezma, C., Moss, R. and Verdugo, R., Geo-Engineering Reconnaissance of the February 27, 2010 Maule, Chile Earthquake, Version 2, May 25, 2010, Geotechnical Extreme Events Reconnaissance, 11-15, 2010.
- [9] Mahdavian, A., Shiro, T., Shabdiz, S., Fujinuma Dam Performance during 2011 Tohoku Earthquake, Japan and Failure mechanism by FEM, 15 WCEE, Lisboa 2012.
- [10] Maddah, A., Soroush, A., Tabatabaie, P.S., Effects of material properties on behaviour of earth dam clay cores in narrow valleys, Sci. Iran. 22, 1692–1702, 2015.
- [11] Vargas, C.O., Analysis and seismic design of tailings dams and liquefaction assessment, Advances in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 7, 392–416, 2017.
- [12] International Commission on Large Dams (ICOLD), Selecting Seismic Parameters for Large Dams, Guidelines, Bulletin 148, Paris, France, 2016.
- [13] Sica, S., Pagano, L., Performance-based analysis of earth dams procedures and application to a simple case, Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society 49(6), 921–939, 2009.
- [14] United States Committee on Large Dams (USCOLD), Observed Performance of Dams During Earthquakes, Volume I, 1992.
- [15] Aliberti, D., Biondi, G., Cascone, E., Rampello, S., Performance indexes for seismic analyses of earth dams, Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions – Silvestri & Moraci, Associazione Geotecnica Italiana, Rome, Italy, 2019.

- [16] Hariri-Ardebili, M.A., Tosun, H., Dams in the wake-up call of the 2023 Türkiye earthquake sequence: Insights from observed damages, risk assessment, and monitoring, *International Journal of Disaster Risk* 102,1-22, 2014.
- [17] Buffi, G., Caruana, R., Balsamo, A., Canci, M., Farronato, G., Figini, R., Palmieri, M., Previtali, R., Taffini, E., Zacchei, E., Seismic Behaviour of Earth Dams: World Relevant Cases, *International Symposium on Dams and Earthquakes 7th Meeting of the EWG*, Athens, Greece, 91-102, 2024.
- [18] Zhang, A.T., Gu, V.X., Global Dam Tracker: A database of more than 35,000 dams with location, catchment, and attribute information, *Scientific Data* 10, 1-19, 2023.
- [19] United States Geological Survey (USGS), Science for a changing world, seismic hazard maps and site-specific data, database (accesso nel 2026). <https://www.usgs.gov/>
- [20] Turkish Accelerometric Database and Analysis System (TADAS), database (accesso nel 2026). <https://tadas.afad.gov.tr>.
- [21] Cetin, K.O., Cuceoglu, F., Ayhan, B.U., Yildirim, S., Aydin, S., Demirdogen, S., Er, Y., Gurbuz, A., Moss, R.E.S., Performance of hydraulic structures during 6 February 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake sequence, *Earthquake Spectra* 40, 2231-2267, 2024.
- [22] Ling, P., Huang, B., Li, Q., Wang, R., Hazard and seismic reinforcement analysis for typical large dams following the Wenchuan earthquake, *Engineering Geology*, 2014.
- [23] Earthquake Engineering Research Institute, February 6, 2023 Türkiye earthquakes: Report on Geoscience and Engineering Impacts, GEER Association Report 82, May 6, 2023.
- [24] Newmark, N.M., Effects of earthquakes on dams and embankments, *Geotechnique*, 15(2), 1965.
- [25] Matsumoto, N., Sasaki, T., Ohmachi, T., The 2011 Tohoku Earthquake and Dams, *International Commission on Large Dams (ICOLD)*, 89th Annual Meeting in Lucerne, June 1, 2011.

6. ALLEGATI

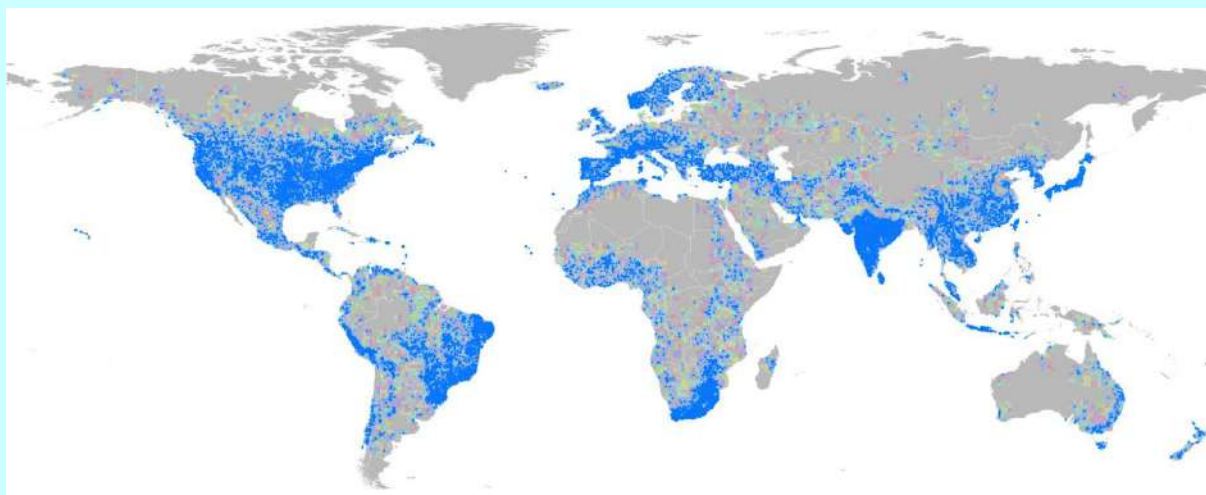
In allegato vengono presentate le schede di sintesi relative ai principali casi studio analizzati nell'ambito delle attività del gruppo di lavoro. Ogni scheda raccoglie in maniera sintetica e strutturata le informazioni più rilevanti riguardanti gli eventi sismici che hanno interessato dighe di materiali sciolti a livello internazionale.

Le schede includono, per ciascun caso, i seguenti elementi: Nome della diga e paese in cui si trova; tipologia della diga e principali caratteristiche costruttive; caratteristiche del terremoto. Inoltre, si indicano i danni osservati al corpo diga e alle opere accessorie, oppure l'eventuale assenza di danni significativi, i provvedimenti adottati a seguito dell'evento, le immagini e le informazioni aggiuntive, utili per la contestualizzazione e la comprensione del caso.

Le schede rappresentano uno strumento sintetico ma efficace per la consultazione dei dati, finalizzato a supportare le analisi comparative e lo studio dei meccanismi di risposta delle dighe soggette ad azioni sismiche.

ITCOLD
Comitato Nazionale Italiano delle Grandi Dighe

Schede Tecniche

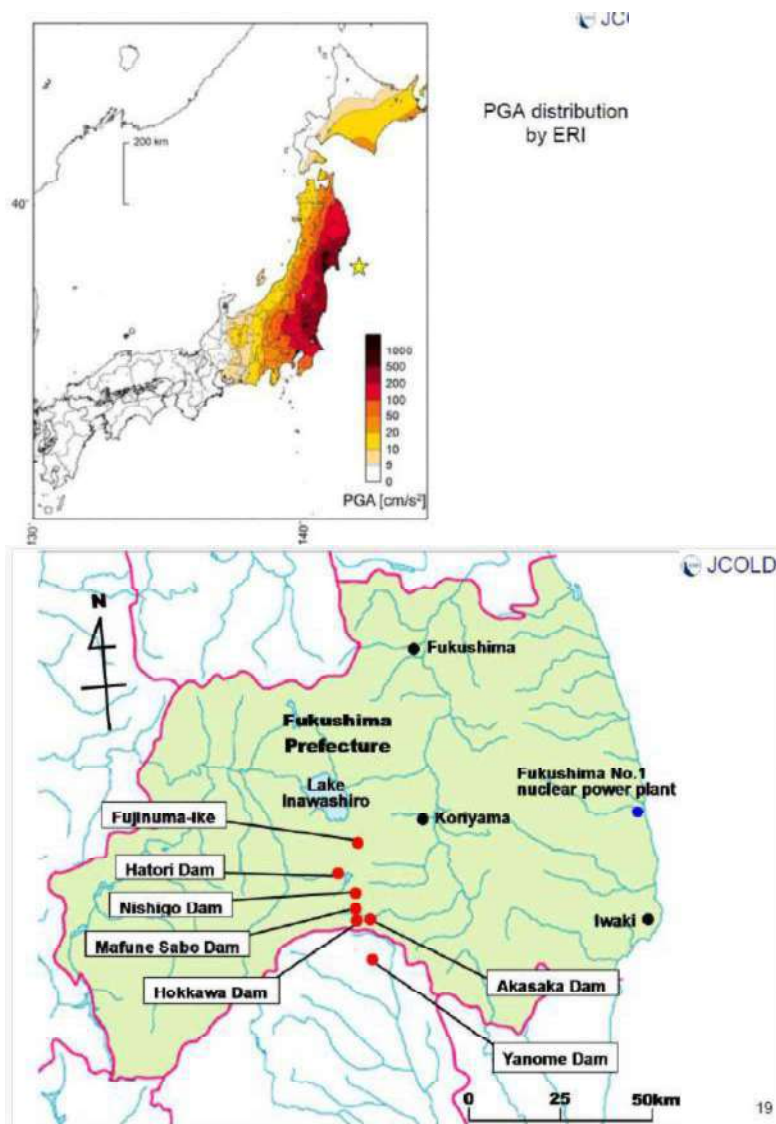


2026

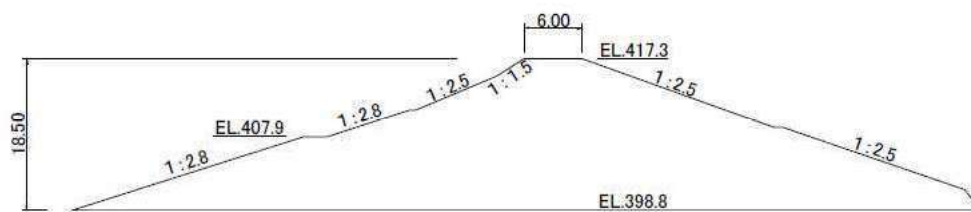
Nome della diga		Fujinuma dam
Paese		Giappone
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga in terra zonata. Altezza: 18,5 m Lunghezza coronamento: 133,2 m Quota coronamento: 417,3 m slm Inclinazione paramento valle: 1:2,5 Inclinazione paramento monte: 1:2,8 – 1:2,5 – 1:1,5 Anno di costruzione: 1949
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	11 Marzo 2011 – Tohoku
	Distanza epicentro – diga (km)	220 km
	Magnitudo (M_L o M_W)	9.0 (M_W)
	Profondità (km)	24 km
	a_{max} registrata alla diga (g)	$p_{ga} = 0.32g$ (stimata, registrazioni non disponibili)
	Livello di invaso (msm)	Valore numerico nd: indicato nei report come invaso quasi pieno
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Collasso dello sbarramento principale. La rottura della diga principale dalle testimonianze è iniziata circa 20 minuti dopo il terremoto, e una fotografia, scattata circa 25 minuti dopo il sisma, mostra la quasi totalità dello sviluppo diga sormontato dalle acque. Lo scarico incontrollato attraverso la breccia è stato canalizzato da una valle stretta, distruggendo un piccolo villaggio allo sbocco della valle, e uccidendo 8 persone. Secondo EERI (2011) la diga è stata tracimata a causa di un cedimento del coronamento. Il report EERI ha ipotizzato tre possibili cause per l'abbassamento della cresta della diga: (a) un collasso del pendio dello sbarramento lato monte, (b) un collasso del pendio a valle risultante da un meccanismo di scorrimento su uno spesso strato di paleo-terreni organici, (c) scorrimento a valle attraverso un riempimento scarsamente compattato. EERI ha indicato che anche un meccanismo di erosione sarebbe stato possibile, con flusso attraverso le fessure in cresta o filtrazioni interne.

	Una piccola diga di sella in sito che conteneva il tratto sud-est del Lago Fujinuma è anche collassata a causa del terremoto. Questa diga secondaria è stata caratterizzata da un cedimento della sponda di monte verso il bacino. Secondo EERI (2011), il collasso della diga di sella potrebbe essere stato causato da perdita di resistenza durante il terremoto, e quindi scorrimento, o da un rapido svaso conseguente al rapido rilascio di acqua dalla breccia della diga principale. Pradel et al. (2012), dopo investigazioni in sito, hanno concluso che il meccanismo più probabile di collasso della diga principale è stata una frana indotta dal terremoto, con piano basale localizzato nello strato di terreno altamente organico. Basandosi su osservazioni di campo, si è raggiunta la conclusione che probabilmente una frana del pendio a valle diga è occorsa durante il terremoto di Tohoku. Gli spostamenti sismici sono stati sufficienti ad abbassare la cresta della diga e hanno consentito, inizialmente, un lento rilascio di acqua al di sopra della cresta dello sbarramento. La tracimazione ha causato erosione progressiva nella parte sommitale dello sbarramento, che è culminata in una breccia improvvisa con rilascio incontrollato di acqua a valle. Attraverso modellazione numerica gli autori hanno determinato l'entità del cedimento in cresta che ha causato la tracimazione, pari a circa 1,1 m.
Provvedimenti adottati	-

Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico



Localizzazione della diga e posizione rispetto a mainshock



Sezione della diga



Fotografia dopo il collasso della diga principale

Looking towards right abutment



Fotografia dopo il collasso della diga principale

Right abutment

JCOL



Fotografia dopo il collasso della diga principale

Fujinuma-ike saddle embankment

JCC



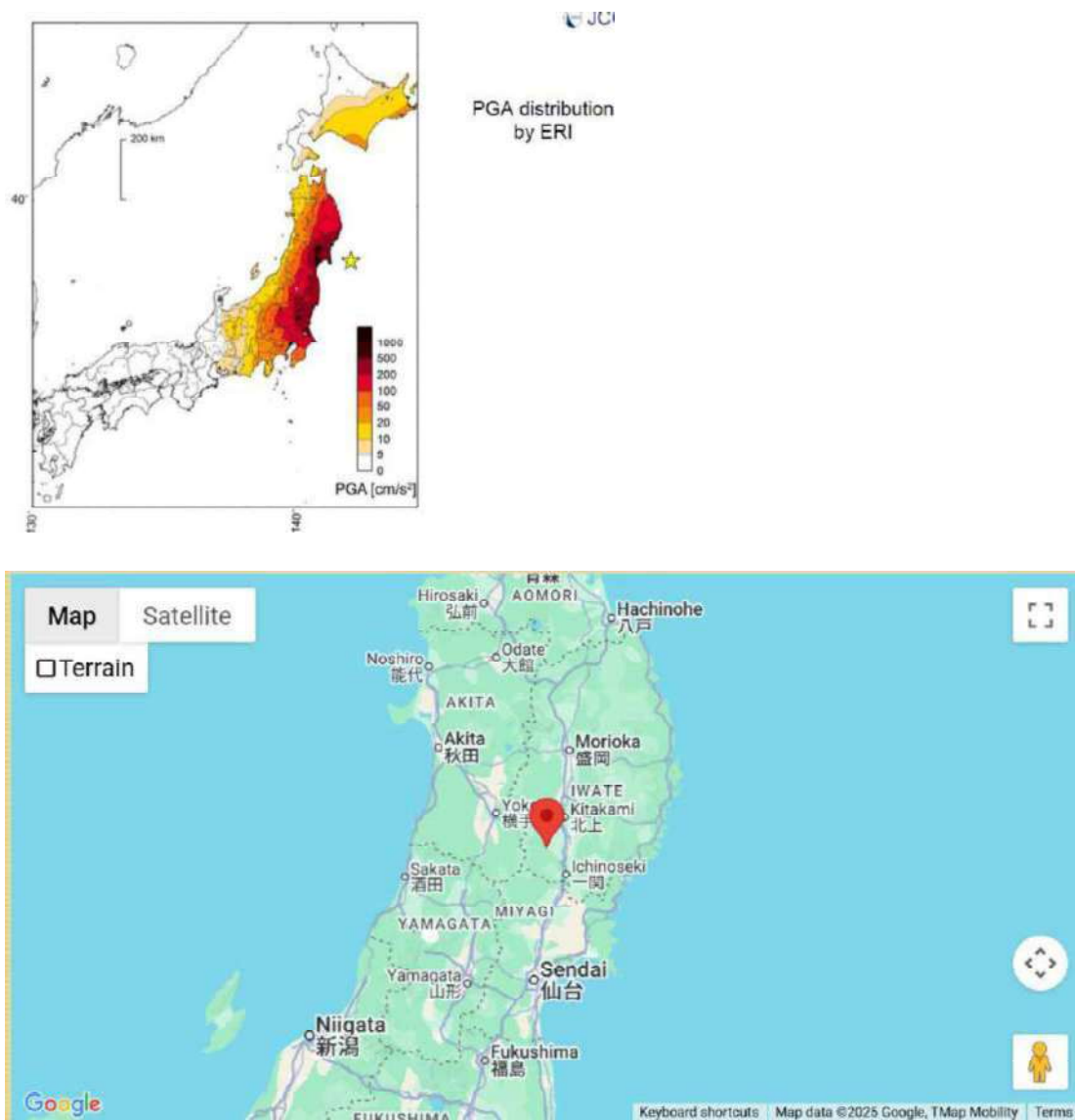
Fotografia dopo il collasso della diga di sella secondaria

BIBLIOGRAFIA:

- USSD, "Observed Performance of Dams During Earthquakes", Volume III, 2014;
- Pradel et al., "Failure of the Fujinuma Dams during the March 11, 2011 Tohoku Earthquake", 2012;
- Matsumoto et al., "The 2011 Tohoku Earthquake and Dams", ICOLD 89th Annual Meeting in Lucerne June 1, 2011

Nome della diga		Koromogawa dam
Paese		Giappone
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga in terra zonata. Altezza: 35,5 m Lunghezza coronamento: 212 m Anno di costruzione: 1963
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	11 Marzo 2011 – Tohoku
	Distanza epicentro – diga (km)	151 km
	Magnitudo (M_L o M_W)	9.0 (M_W)
	Profondità (km)	24 km
	a_{max} registrata alla diga (g)	$p_{ga} = 0.50g$ (stimata, registrazioni non disponibili)
	Livello di invaso (msm)	-
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Fessurazioni longitudinali su coronamento diga e cedimenti in cresta stimati pari a circa 30 cm (0,88%).
Provvedimenti adottati		-

Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico



Localizzazione della diga e posizione rispetto a mainshock

Koromogawa No. 1 Dam 2011 Tohoku Earthquake



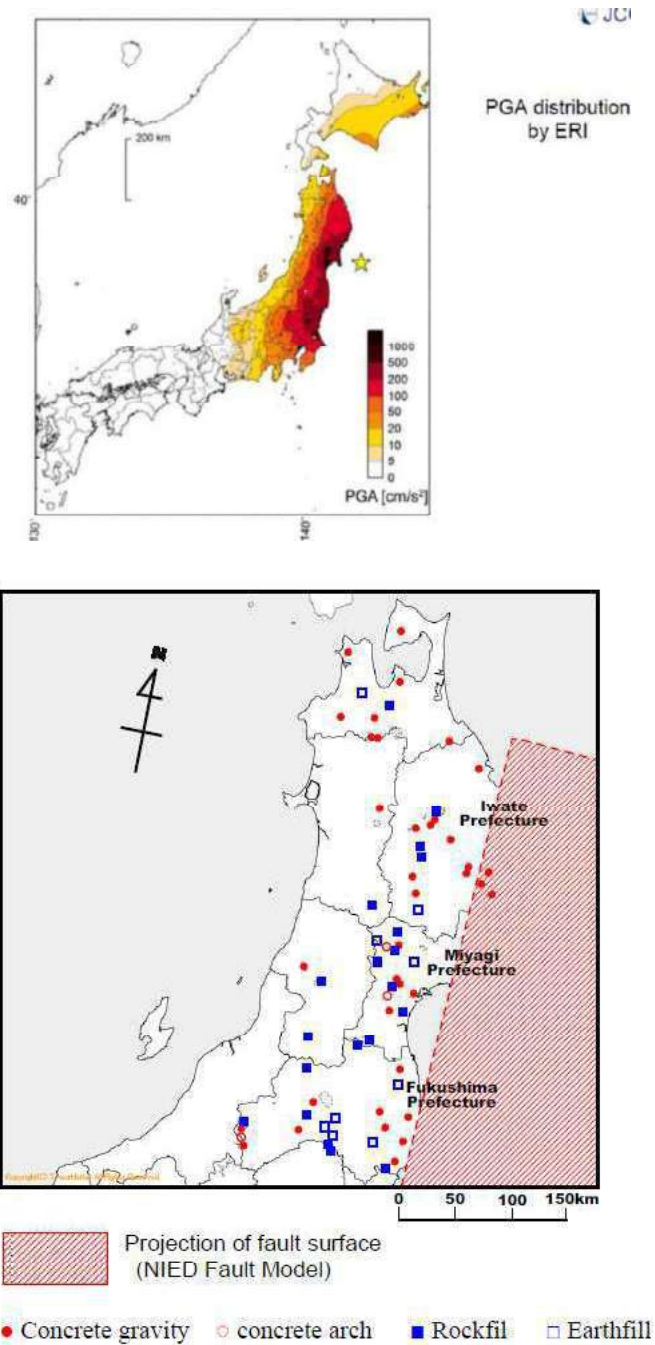
Fotografie della diga post terremoto

BIBLIOGRAFIA:

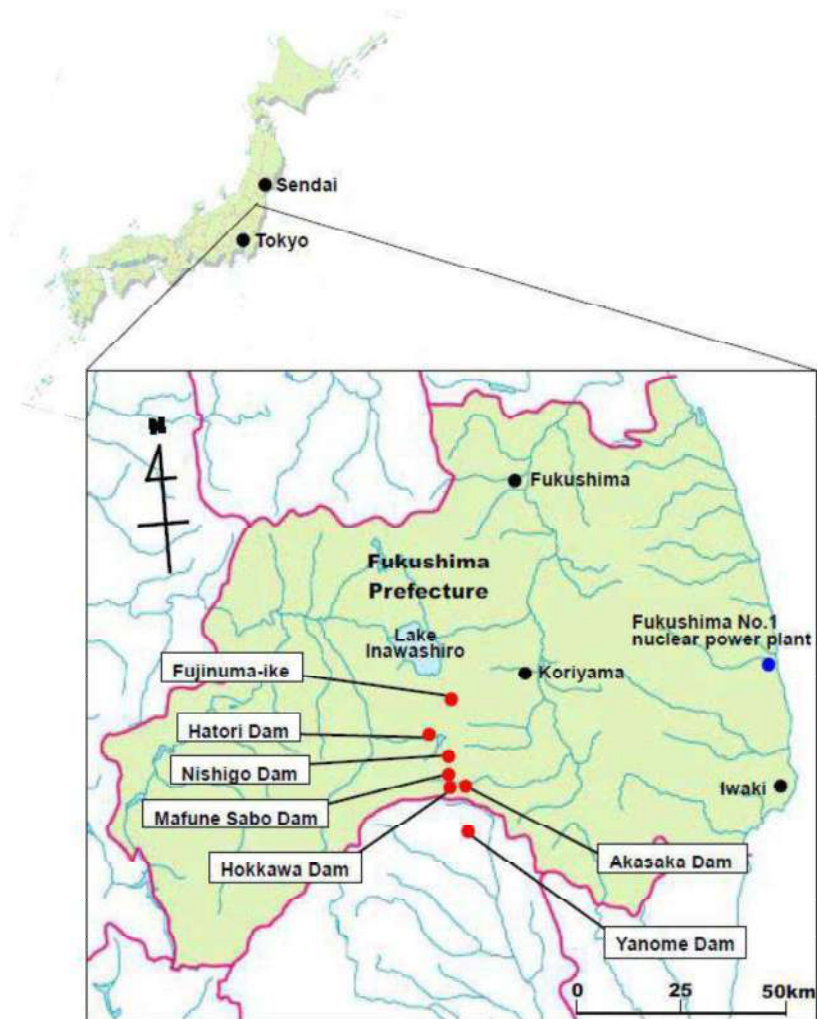
- Matsumoto et al., "The 2011 Tohoku Earthquake and Dams", ICOLD 89th Annual Meeting in Lucerne June 1, 2011.

Nome della diga		Nishigo dam
Paese		Giappone
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga in terra zonata. Altezza: 32,5 m Lunghezza coronamento: 220 m Anno di costruzione: 1955
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	11 Marzo 2011 – Tohoku
	distanza epicentro – diga (km)	235 km
	magnitudo (M_L o M_W)	9.0 (Mw)
	profondità (km)	24 km
	a_{max} registrata alla diga (g)	$p_{ga} = 0.27g$ (stimata, registrazioni non disponibili)
	Livello di invaso (msm)	-
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Fessurazioni longitudinali su coronamento diga (asfalto) e cedimenti in cresta stimati pari a circa 8 cm (0,24%).
Provvedimenti adottati		-

Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico



Localizzazione della diga e posizione rispetto a mainshock



Localizzazione della diga e posizione rispetto a mainshock

Nishigo Dam H=32.5m completed in 1955
March 11, 2011 on the day



Fotografia della diga post terremoto

Nishigo Dam April 11, 2011
one month after the event, drawdown of water



Fotografia della diga post terremoto



Figure 11. Nishigo Dam; cracking on the crest

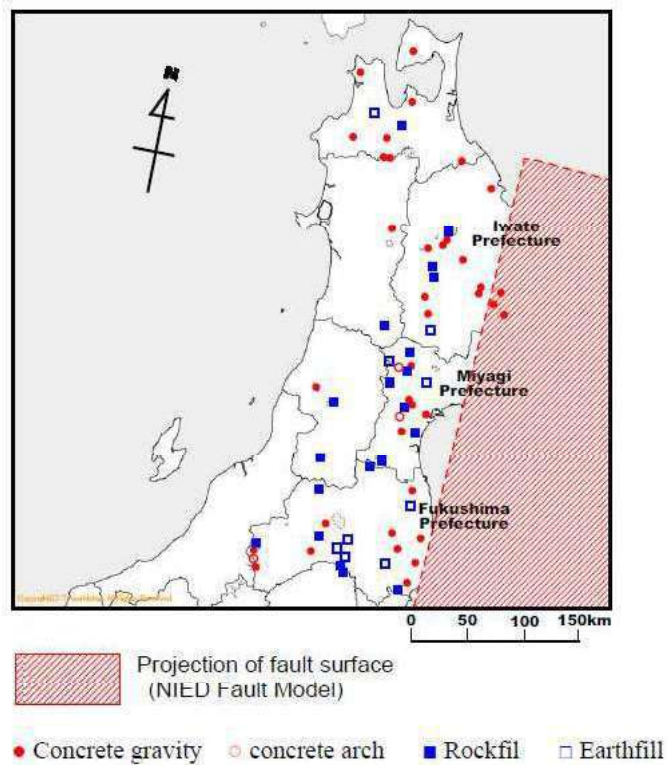
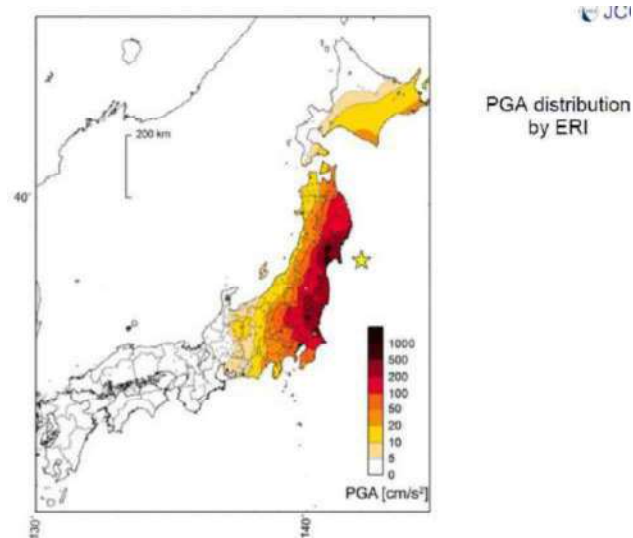
Fotografia della diga post terremoto

BIBLIOGRAFIA:

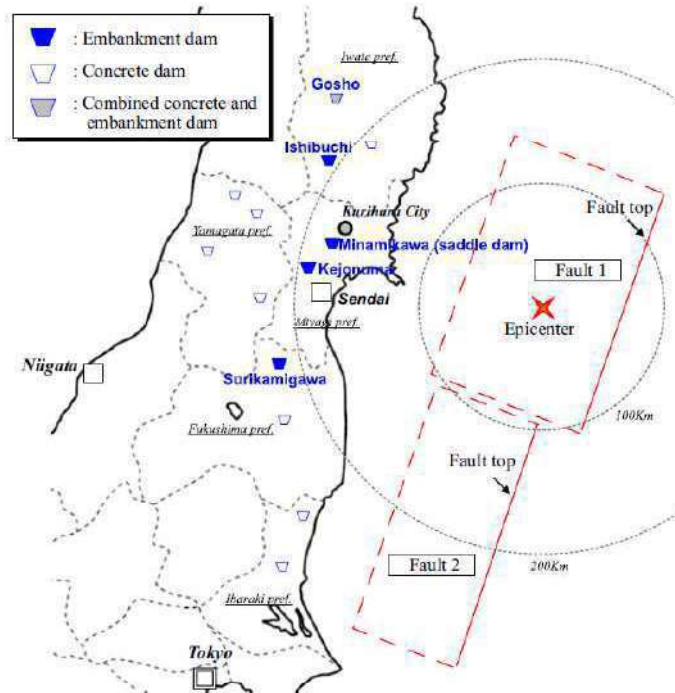
- Matsumoto et al., "The 2011 Tohoku Earthquake and Dams", ICOLD 89th Annual Meeting in Lucerne June 1, 2011.

Nome della diga		Minamikawa dam
Paese		Giappone
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga in rockfill con manto in asfalto. Altezza: 19,6 m Quota coronamento: 103 m slm Anno di costruzione: 1987
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	11 Marzo 2011 – Tohoku
	distanza epicentro – diga (km)	182 km
	magnitudo (M_L o M_W)	9.0 (M_W)
	profondità (km)	24 km
	a_{max} registrata alla diga (g)	$p_{ga} = 0.27g$ (da registrazioni disponibili della diga principale)
	Livello di invaso (msm)	nd
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Il terremoto ha causato un incremento temporaneo delle perdite da circa 0,3 l/s a circa 1,5 l/s, una fessurazione nel manto in asfalto a monte (riscontrate due fessure relativamente lunghe sul paramento di monte in asfalto) e un cedimento massimo in cresta pari a circa 9 cm (0,5%). In cresta è stata misurata un'accelerazione di picco pari a 1.3g, mentre un'accelerazione di 0.27g è stata misurata nella fondazione della diga principale in calcestruzzo, a 1 km di distanza.
Provvedimenti adottati		Programmate parziali ricostruzioni del manto in asfalto danneggiato.

Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico



Localizzazione della diga e posizione rispetto a mainshock



Localizzazione della diga e posizione rispetto a mainshock

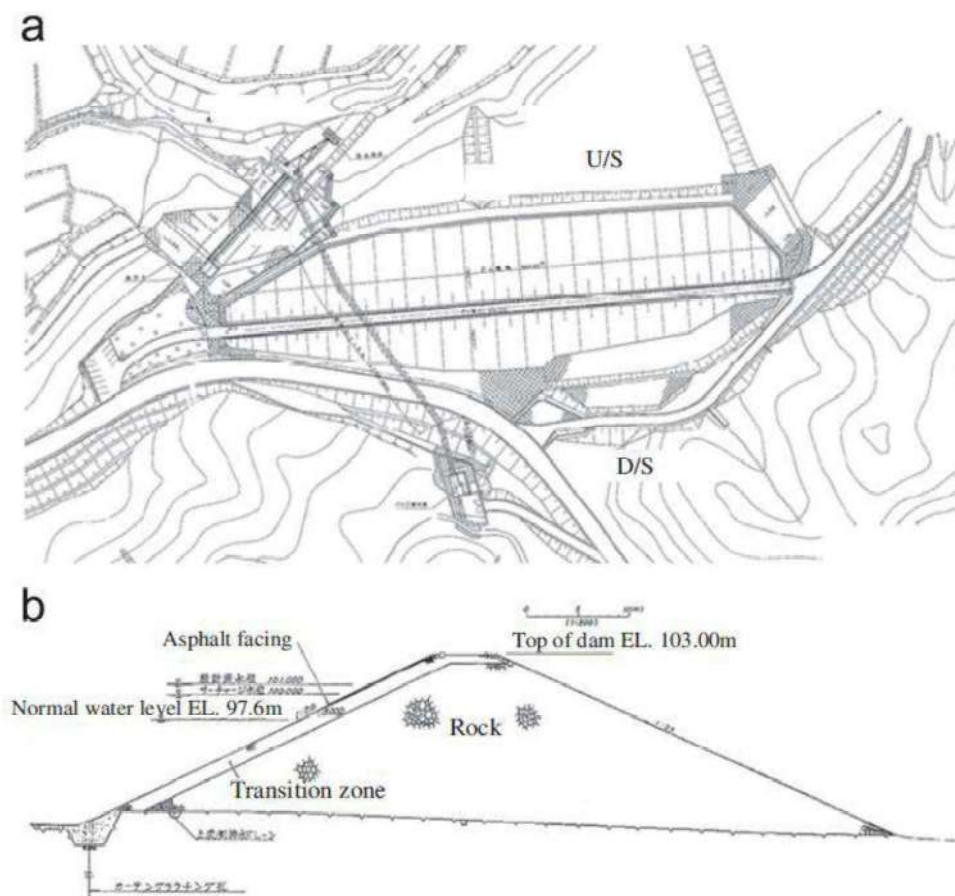


Fig. 10. Minamikawa Saddle Dam.

Planimetria e sezione diga



Saddle dam: asphalt concrete face rockfill

Fotografia della diga post terremoto



Figure 7 Asphaltic concrete face of Minamikawa Saddle Dam

Fotografia della diga post terremoto



Photo 5. Cracking of the asphalt facing of the Minamikawa Saddle Dam.

Fotografia della diga post terremoto

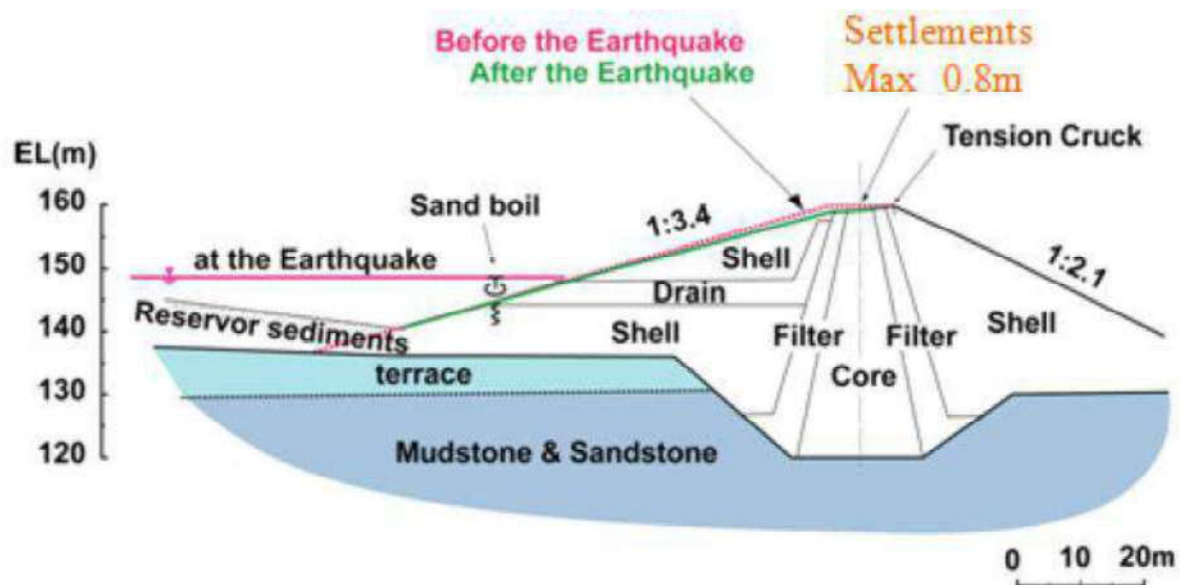
BIBLIOGRAFIA:

- Matsumoto et al., "The 2011 Tohoku Earthquake and Dams", ICOLD 89th Annual Meeting in Lucerne June 1, 2011;
- Yamaguchi et al., "Safety inspections and seismic behavior of embankment dams during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake", 2012;
- USSD, "Observed Performance of Dams During Earthquakes" Volume III, 2014.

Nome della diga		Murayama inferiore
Paese		Giappone
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		In terra in corso di costruzione all'atto del terremoto 16,20m su 30,30M previsti
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	terremoto del Kanto Baia di Sagami Giappone 1/09/1923
	Distanza epicentro – diga (km)	18
	Magnitudo (M_L o M_W)	M=7,9
	Profondità (km)	61km
	a_{max} registrata alla diga (g)	0,42 (stimata)
	Livello di invaso (m s.l.m.)	
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Fessure parallele all'asse max 2,4cm di larghezza, 10m di profondità, 68m di lunghezza. Fessure in corrispondenza della zona più debole della fondazione.
Provvedimenti adottati		-
Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico		
		
BIBLIOGRAFIA - F.Arredi, “Memorie Scelte”, vol2 pagg. 378 e seguenti.		

Nome della diga		Otaniike dam
Paese		Giappone
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Zonata con nucleo centrale altezza 27m costruita nel 1920
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	Nankai 21/12/1946
	Distanza epicentro – diga (km)	80
	Magnitudo (M_L o M_W)	Mw 8,3
	Profondità (km)	30 Km
	a_{max} registrata alla diga (g)	0.01 (stimata)
	Livello di invaso (m s.l.m.)	
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Nel terremoto di Nankai del 1946 la diga Otaniike, del tipo zonata con nucleo centrale, di 27m di altezza, costruita nel 1920, ebbe una fessura sul coronamento e parallela all'asse, di 84 m di lunghezza ed altre fessure, ancora parallele all'asse, sul paramento di monte a distanza di 12m e 22m dal ciglio di monte del coronamento, di lunghezza tra 60m e 24m rispettivamente.
Provvedimenti adottati		-
BIBLIOGRAFIA - USCOLD, "Observed Performance of Dams During Earthquakes", Volume I; - Arredi, F., "Dighe in materiali sciolti".		

Nome della diga		Shin-Yamamoto dam
Paese		Giappone
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga in terra zonata. Altezza: 42.4 m Lunghezza coronamento: 1392 m Quota coronamento: ~160 msm Inclinazione paramento valle: 1:2.1 Inclinazione paramento monte: 1:3.4 Anno di costruzione: 1990
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	23 Ottobre 2004 – Mid Niigata Prefecture
	Distanza epicentro – diga (km)	5 km
	Magnitudo (M_L o M_W)	6.6 (Mw)
	Profondità (km)	15.8 km
	a_{max} registrata alla diga (g)	$pga > 0.5g$ (registrazioni non disponibili)
	Livello di invaso (msm)	~148 msm
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Cedimenti significativi del corpo diga, fessure parallele all'asse della diga, liquefazione nelle sabbie, deformazioni da scivolamento superficiale. Massimo cedimento riscontrato nel nucleo centrale argilloso vicino alla sponda sinistra, stimato in circa 80 cm, ovvero pari a circa il 2% dell'altezza della diga. Causa del cedimento attribuita al rilascio degli sforzi ad arco vicino alle spalle, indotta dallo scuotimento sismico. Liquefazione limitata agli strati sabbiosi più superficiali a monte (entro i primi 3 m di profondità), probabilmente non adeguatamente compattati (upstream shell). La funzione di contenimento dell'acqua nel serbatoio non è stata compromessa. Non sono state osservate perdite o filtrazioni in corpo diga.
Provvedimenti adottati		-
Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico		
Localizzazione della diga e posizione rispetto a mainshock e aftershocks:		



Sezione della diga



Inclinazione della pavimentazione sul coronamento



Danni osservati nella pavimentazione del coronamento



Cedimenti e fessure osservati nella sponda esterna



Cedimenti superficiali osservati sponda lato bacino

BIBLIOGRAFIA:

- USSD, "Observed Performance of Dams During Earthquakes", Volume III, 2014;
- Yasuda et al., "Effects of the Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004 on dams", 2005.

Nome della diga		Oya
Paese		Giappone
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Earthfill (E) Costruita nel 1993 Altezza, $H = 56.20$ m Lunghezza del coronamento, $L_c = 250.0$ m
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	Noto Peninsula, Giappone, 01/01/2024
	Distanza epicentro – diga (km)	14.0
	Magnitudo (M_L o M_W)	$M = 7.5$
	Profondità (km)	10.0
	a_{max} registrata alla diga (g)	0.53
	Durata (s)	-
	Livello di invaso (m s.l.m.)	N/A
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Cedimento verticale di 0.36 m
Provvedimenti adottati		N/A

Immagini e informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico

La diga di Oya è una diga in terra situata nella prefettura di Ishikawa in Giappone. Il suo volume è di $710.0 \times 10^3 \text{ m}^3$. La diga viene utilizzata per il controllo delle inondazioni e l'approvvigionamento idrico. L'area di raccolta della diga è di 12.80 km^2 , investendo circa 24.0 ettari di terreno, e quando è piena può immagazzinare fino a $3050.0 \times 10^3 \text{ m}^3$ di acqua [1, 6]. Nella Figura 1 è mostrata la diga in esame.



Figura 1. Immagine della diga di terra [5].

La mappa in Fig. 2 illustra i valori dei PGAs che si propagano dall'epicentro verso l'esterno. Il terremoto oltre ad essere molto forte è anche superficiale con un profondità dell'ipocentro di 10.0 km.

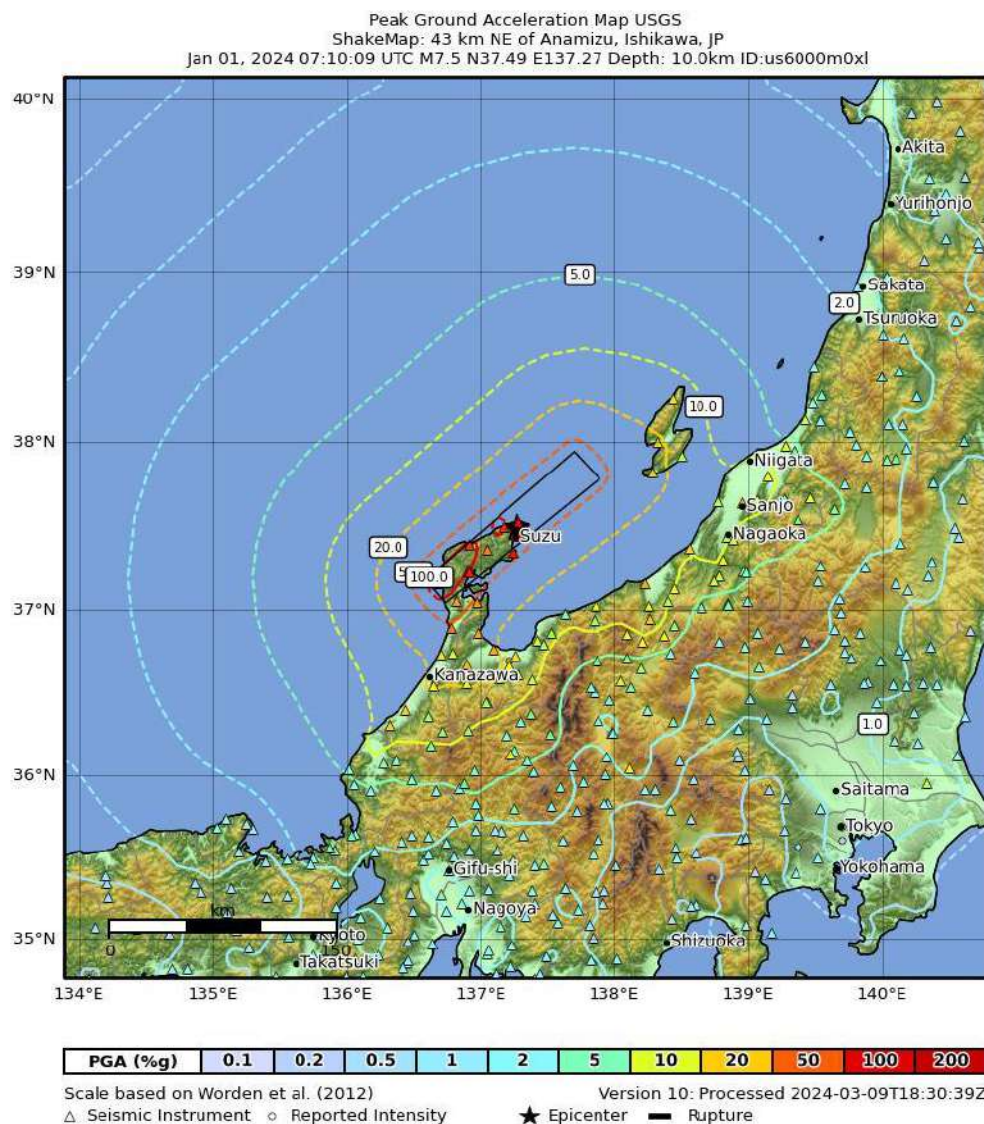


Figura 2. Mappa dei PGAs [7]

Danni riscontrati

La diga ha subito alcuni danni dal terremoto. Il cedimento verticale in cresta registrato è di 0.36 m, pari al 0.64% (in assenza di materiali alluvionali) utilizzando la relazione pubblicata in [3]. Usando la relazione in [4], si ottiene 0.51 m. Questo cedimento in % corrisponde a lo stato limite di danno (SLD) secondo la classificazione pubblicata in [2].

Conclusioni e Provvedimenti adottati

Nessun dato riportato.

References

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Oya_Dam (accesso 02/2025).
- [2] Aliberti, D., Biondi, G., Cascone, E., Rampello, S., Performance indexes for seismic analyses of earth dams, Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions 2019, 1066-1073, 2019.
- [3] Swaisgood, J.R., Earth dam deformations caused by earthquakes, 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering, Paper number 014, 1-8, 2003.
- [4] Swaisgood, J.R., Behaviour of earth dams during earthquake, The Journal of Dam Safety 12, 1-10, 2014.
- [5] <http://damnet.or.jp/cgi-bin/binranA/enAll.cgi?db4=0926> (accesso 02/2025).

[6] Yu, L., Kong, X., Xu, B., Seismic response characteristics of earth and rockfill dams, 15 WCEE Conference, Lisbon, Portugal, 1-9, 2012.

[7] United States Geological Survey (USGS), Science for a Changing World, U.S. Department of the Interior, USA, database. Acesso: 02/2025

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000m0xl/shakemap/pga>

Nome della diga		Gosho
Paese		Giappone
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Earth core rockfill dams (ECDR) Costruita nel 1981 Altezza, $H = 52.0$ m Lunghezza del coronamento, $L_c = 327.0$ m
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	Noshiro, Giappone, 26/05/1983
	Distanza epicentro – diga (km)	186.0
	Magnitudo (M_L o M_W)	$M = 7.4$
	Profondità (km)	23.70
	a_{max} registrata alla diga (g)	0.75
	Durata (s)	-
	Livello di invaso (m s.l.m.)	N/A
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Nessuno
Provvedimenti adottati		N/A

Immagini e informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico

La diga di Gosho è la quinta tra le grandi dighe create nella valle del fiume Kitakami. È stata progettata per l'irrigazione, lo stoccaggio di acque per uso industriale, il controllo delle inondazioni e per la produzione di energia elettrica. La costruzione della diga iniziò nel 1967 e terminò nel 1981. Nella Figura 1 è mostrato il bacino idrico e la diga.



Figura 1. Immagine del bacino idrico e della diga di terra [5].

Oltre ai dati menzionati, possiamo aggiungere che il volume della diga è di $1200.0 \times 10^3 \text{ m}^3$, il bacino ha una capacità di $65000.0 \times 10^3 \text{ m}^3$ investendo una area di 635.0 km^2 , e la produzione di energia è di 13000 kW [1].

La mappa nella Fig. 2 illustra i valori dei PGAs dall'epicentro verso l'esterno. Nonostante il terremoto fosse superficiale e forte, la diga non ha subito danni dovuto alla sua distanza dall'epicentro.

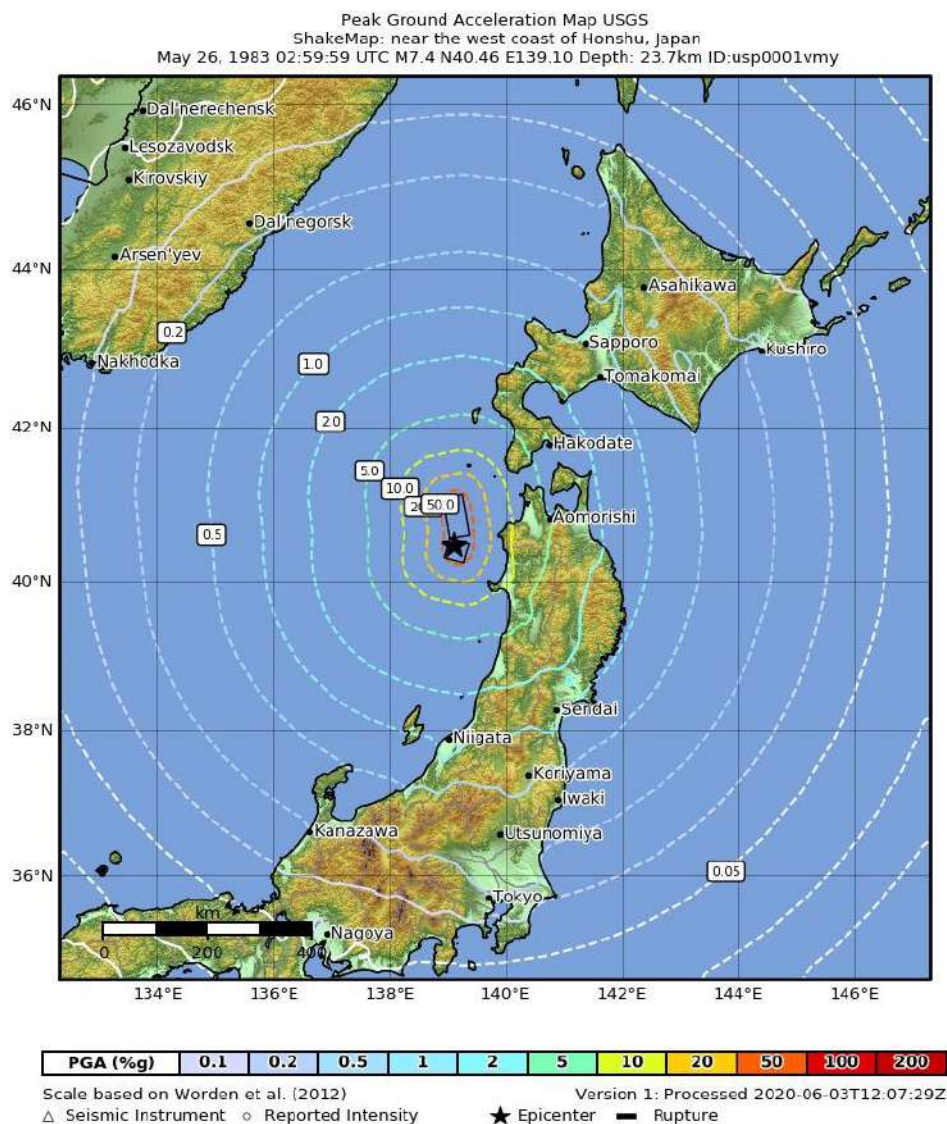


Figura 2. Mappa dei PGAs [3]

Danni riscontrati

La diga non ha subito danni. Effettivamente la classificazione pubblicata in [2] lo conferma. Teoricamente, per un epicentro vicino alla diga, usando la relazione in [4], si otterrebbe un cedimento di 0.03%.

Conclusioni e Provvedimenti adottati

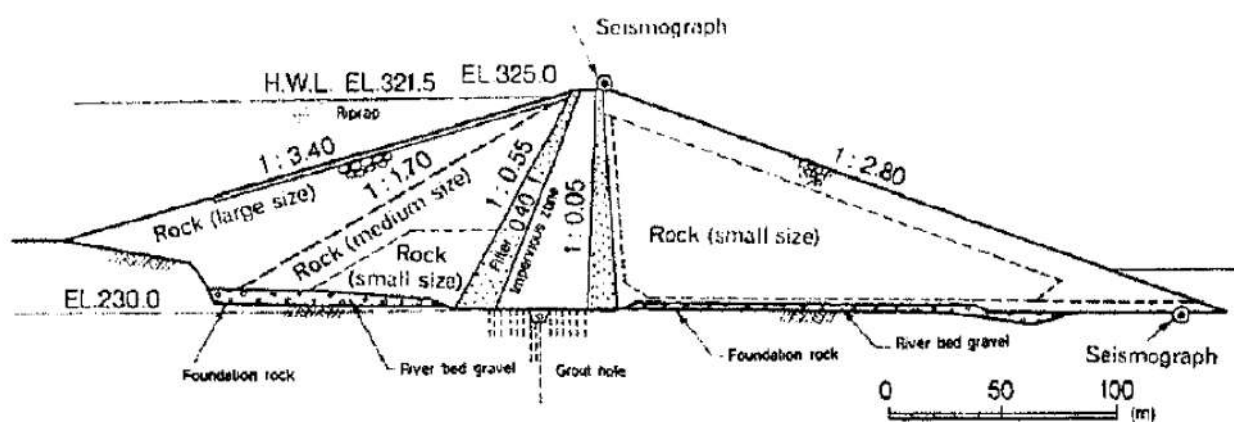
Nessun dato riportato.

References

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Gosho_Dam (accesso 03/2025).
- [2] Aliberti, D., Biondi, G., Cascone, E., Rampello, S., Performance indexes for seismic analyses of earth dams, Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions 2019, 1066-1073, 2019.
- [3] United States Geological Survey (USGS), Science for a Changing World, U.S. Department of the Interior, USA, database. Accesso: 03/2025.
<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0001vmy/shakemap/pgs>
- [4] Swaisgood, J.R., Behaviour of earth dams during earthquake, The Journal of Dam Safety 12, 1-10, 2014.
- [5] <http://damnet.or.jp/cgi-bin/binranA/enAll.cgi?db4=0256> (accesso 03/2025).

Nome della diga		Miho dam
Paese		Giappone
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga in terra (ECD) Anno di fine costruzione 1978 Hmax = 95.0 m Lunghezza coronamento = 587.7 m Volume d'invaso $64.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ Utilizzo: Multiplo
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	29 giugno 1980, penisola di Izu (Giappone)
	Distanza epicentro – diga (km)	68
	Magnitudo (M_L o M_W)	6.3
	Profondità (km)	10
	$a_{\max}$ registrata alla diga (g)	0.03 (Stimata)
	Livello di invaso (m s.l.m.) durante l'evento sismico	-
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Nessuno
Provvedimenti adottati		-

Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico



Sezione trasversale tipo



Vista satellitare

BIBLIOGRAFIA:

- Iwashita T., Yasuda N., Yasuda A., Takeda O..Dynamic Deformation Characteristics of Rockfill Materials from Laboratory Test, In-Situ Test and Earthquake Motion Analysis. Third International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. April 1-7, 1995, Volume I, St. louis, Missouri;
- Matsumoto N., The Recent Earthquakes and Dam Safety in Japan ICOLD Europe 2010;
- Sica S, Pagano F., Performance-based analysis of earth dams procedures and application to a sample case. Soils and Foundations vol. 49, no. 6, 921–939, dec. 2009 Japanese Geotechnical Society.

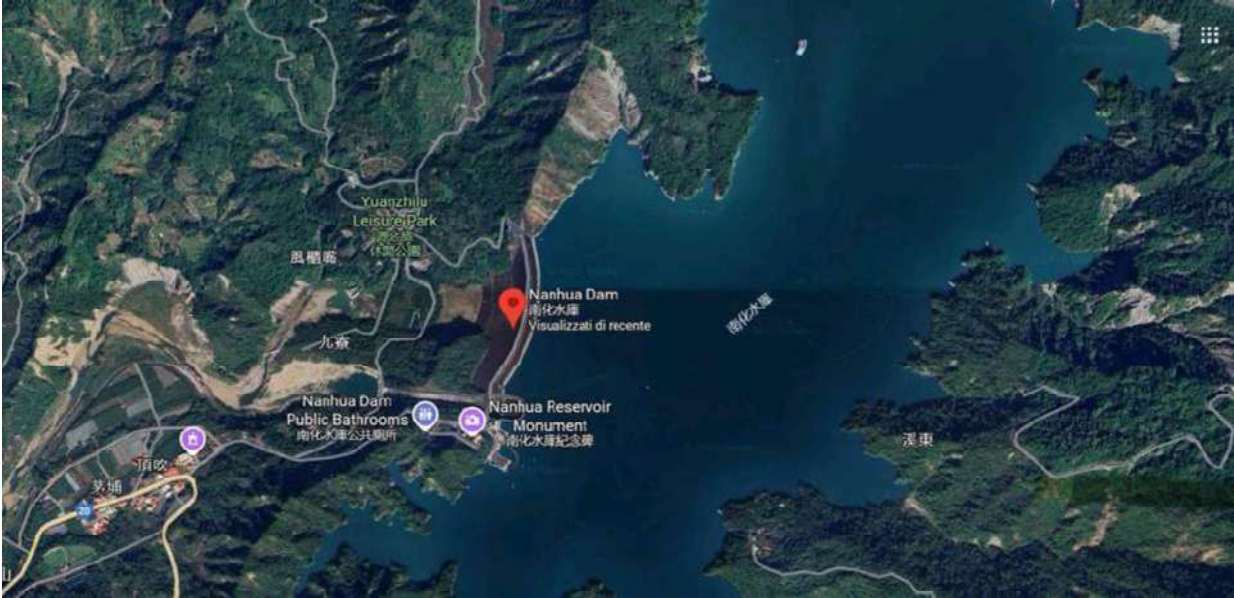
Nome della diga		Tsengwen (o Zengwen) dam
Paese		Taiwan
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga zonata in pietrame (rockfill) Altezza 133 m Sviluppo coronamento ca. 400 m Spessore alla quota coronamento ca. 10 m Anno di completamento 1974 Organi di scarico: n.1 di superficie costituito da n 3 luci intercettate da paratoie a settore
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	21 settembre 1999, Chi Chi (Taiwan)
	Distanza epicentro – diga (km)	73
	Magnitudo (M_L o M_W)	7.6
	Profondità (km)	7
	a_{max} registrata alla diga (g)	0.03
	Livello di vaso (m s.l.m.) durante l'evento sismico	massimo livello di regolazione
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Nessun danno significativo associato a cedimento massimo di 2,66 cm
Provvedimenti adottati		Nessuno
Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico Diga con scopo di approvvigionamento idrico, laminazione delle piene, produzione energia elettrica, ricreazione e turismo.		
		
Vista in pianta dell'opera		



Vista da valle dello sbarramento

BIBLIOGRAFIA:

- Stefania Sica and Luca Pagano - Performance-Based Analysis of Earth Dams: Procedures and Application to a Sample Case;
- EPRI – Investigation of the 1999 Chi Chi Taiwan Earthquake – Technical Report;
- R. G. Charlwood, T. E. Little, J. K. Lou – A Review of the Performance of two Larger Dams during the Chi Chi Taiwan Earthquake;
- J. C. Chern, M. S. Tsai – Seismic Safety Analysis of Earth Dam – Case History Studies (2001).

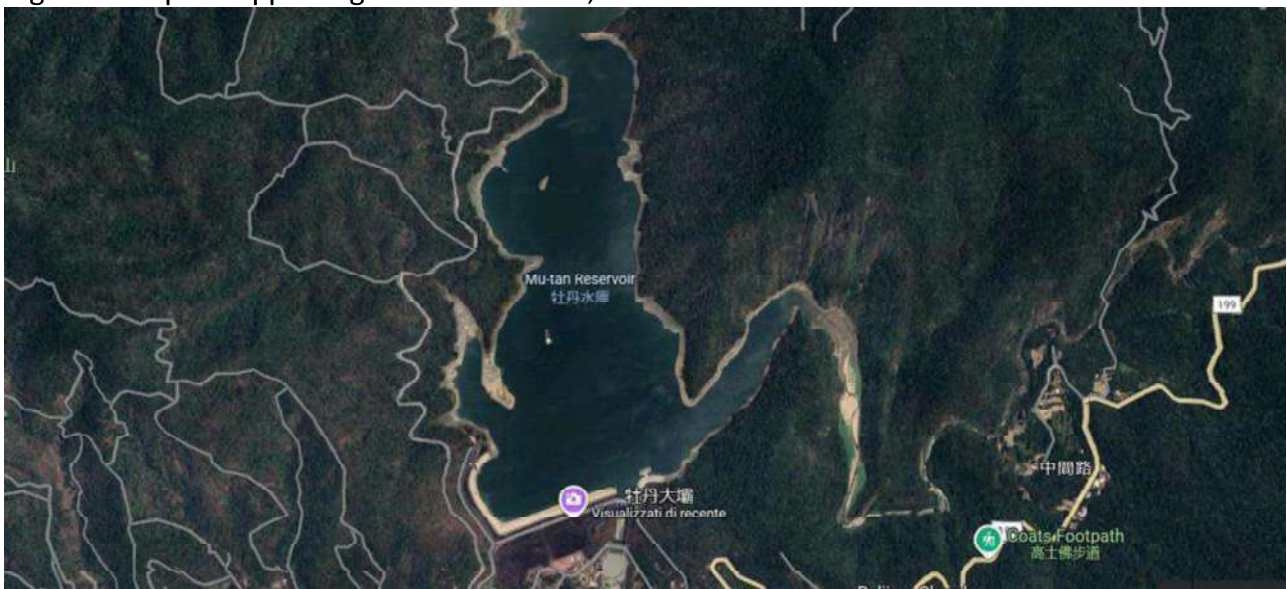
Nome della diga		Nanhua dam
Paese		Taiwan
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga zonata in terra (earthfill) con protezione a scogliera del paramento di monte e pietrame del paramento di valle Altezza 87.5 m Sviluppo coronamento ca. 511 m Spessore alla quota coronamento ca. 10 m Anno di completamento 1994 Organi di scarico: n.1 di superficie a soglia fissa curvilinea in sponda sinistra
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	21 settembre 1999, Chi Chi (Taiwan)
	Distanza epicentro – diga (km)	87
	Magnitudo (M_L o M_W)	7.6
	Profondità (km)	7
	a_{max} registrata alla diga (g)	<0.037
	Livello di invaso (m s.l.m.) durante l'evento sismico	massimo livello di regolazione
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Nessun danno significativo associato a cedimento di 0.875 cm
Provvedimenti adottati		Nessuno
Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico Diga con scopo di approvvigionamento idrico, ricreazione e turismo.		
		
Vista in pianta dell'opera		



Vista dalla sponda sinistra dello sbarramento

BIBLIOGRAFIA:

- Stefania Sica and Luca Pagano - Performance-Based Analysis of Earth Dams: Procedures and Application to a Sample Case;
- EPRI – Investigation of the 1999 Chi Chi Taiwan Earthquake – Technical Report;
- R. G. Charlwood, T. E. Little, J. K. Lou – A Review of the Performance of two Larger Dams during the Chi Chi Taiwan Earthquake;
- J. C. Chern, M. S. Tsai – Seismic Safety Analysis of Earth Dam – Case History Studies (2001).

Nome della diga		Mudan (o Mu-tan) dam
Paese		Taiwan
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga zonata in terra (earthfill) con protezione a scogliera del paramento di monte e in pietrame del paramento di valle Altezza 62.5 m Sviluppo coronamento ca. 446 m Spessore alla quota coronamento ca. 10 m Anni di completamento 1995 Organi di scarico: n.1 di superficie costituito da n.3 luci intercettate da paratoie a settore
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	21 settembre 1999, Chi Chi (Taiwan)
	Distanza epicentro – diga (km)	182
	Magnitudo (M_L o M_W)	7.6
	Profondità (km)	7
	a_{max} registrata alla diga (g)	<0.1 (Stimata)
	Livello di invaso (m s.l.m.) durante l'evento sismico	massimo livello di regolazione
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Nessun danno significativo associato a cedimento di 0.02 cm
Provvedimenti adottati		Nessuno
Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico Diga con scopo di approvvigionamento idrico, ricreazione e turismo.		
		
Vista in pianta dell'opera		

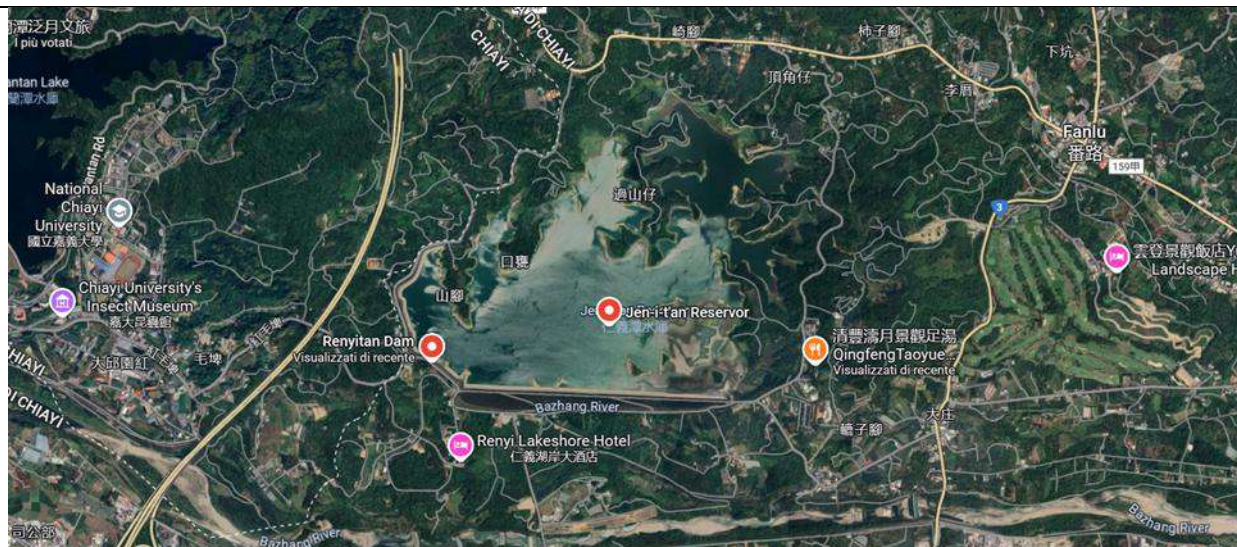


Vista da valle dello sbarramento

BIBLIOGRAFIA:

- Stefania Sica and Luca Pagano - Performance-Based Analysis of Earth Dams: Procedures and Application to a Sample Case;
- EPRI – Investigation of the 1999 Chi Chi Taiwan Earthquake – Technical Report;
- R. G. Charlwood, T. E. Little, J. K. Lou – A Review of the Performance of two Larger Dams during the Chi Chi Taiwan Earthquake;
- J. C. Chern, M. S. Tsai – Seismic Safety Analysis of Earth Dam – Case History Studies (2001).

Nome della diga		Jenyitan (o Renyitan) dam
Paese		Taiwan
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga zonata in terra (earthfill) Altezza 28 m Sviluppo coronamento ca. 1535 m Anno di completamento 1987 Organi di scarico: n.1 di superficie intercettato da paratoia a settore
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	21 settembre 1999, Chi Chi (Taiwan)
	Distanza epicentro – diga (km)	60
	Magnitudo (M_L o M_W)	7.6
	Profondità (km)	7
	a_{max} registrata alla diga (g)	0.68 (misurata nella replica del 22/10/1999, anche nota come terremoto di Chiayi)
	Livello di vaso (m s.l.m.) durante l'evento sismico	massimo livello di regolazione
Danni riscontrati (o assenza di danni)		- Lieve e temporaneo incremento delle infiltrazioni nel corpo diga - Nelle porzioni principali della diga, lieve fessura longitudinale nel manto stradale posto sul coronamento e cedimento di ca. 28 mm - In prossimità dello sfioratore, fessure longitudinali fino a ca. 160 mm di larghezza e 130 m di sviluppo nel manto stradale posto sul coronamento e cedimento di ca. 220 mm - Smottamenti e formazione di fessure di ampiezza da ca. 80 a 350 mm del paramento di monte in prossimità dello sfioratore.
Provvedimenti adottati		La diga ha continuato ad operare senza limitazioni significative. Sono stati eseguiti monitoraggi e lavori di manutenzione post sisma.
Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico Diga con scopo di approvvigionamento idrico, ricreazione e turismo.		



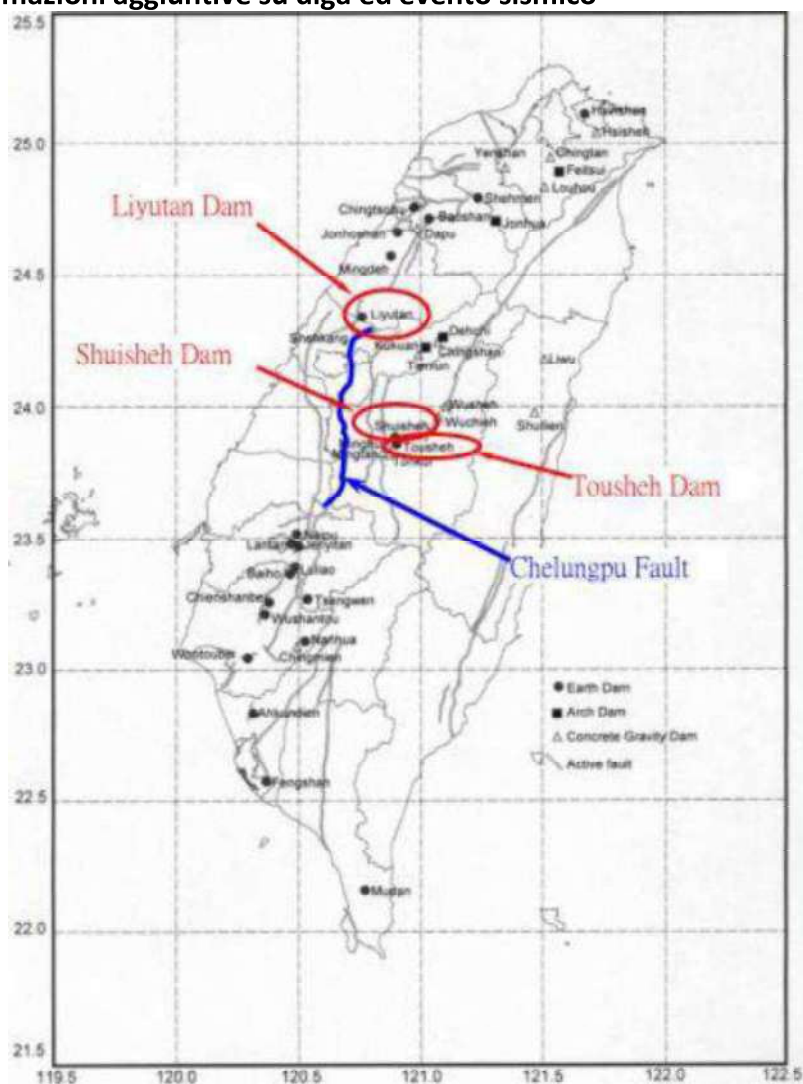
Vista in pianta dell'opera

BIBLIOGRAFIA:

- Stefania Sica and Luca Pagano - Performance-Based Analysis of Earth Dams: Procedures and Application to a Sample Case;
- EPRI – Investigation of the 1999 Chi Chi Taiwan Earthquake – Technical Report;
- R. G. Charwood, T. E. Little, J. K. Lou – A Review of the Performance of two Larger Dams during the Chi Chi Taiwan Earthquake;
- J. C. Chern, M. S. Tsai – Seismic Safety Analysis of Earth Dam – Case History Studies (2001).

Nome della diga		Tousheh dam
Paese		Taiwan
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Earthfill Altezza della diga: 21.8 m
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	21 settembre 1999, Chi-Chi (Taiwan)
	Distanza epicentro – diga (km)	13
	Magnitudo (M_L o M_W)	7.6
	Profondità (km)	-
	a_{max} registrata alla diga (g)	0.46
	Livello di invaso (m s.l.m.) durante l'evento sismico	-
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Cedimento: 27 cm (1.26% of H)
Provvedimenti adottati		-

Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico



Individuazione dell'opera e della faglia

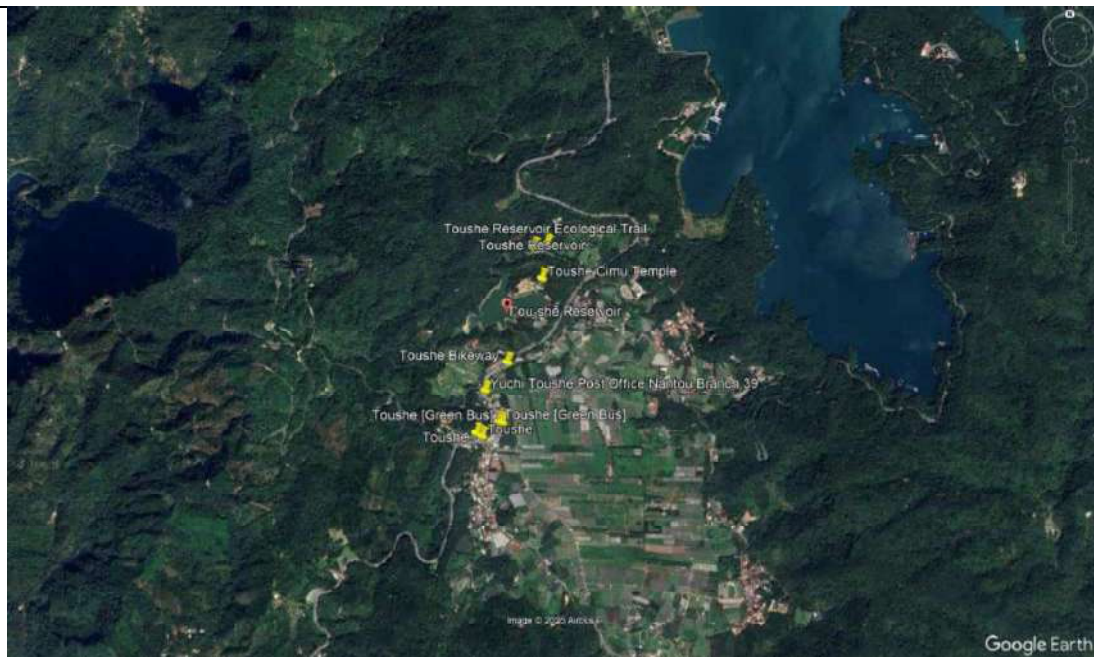
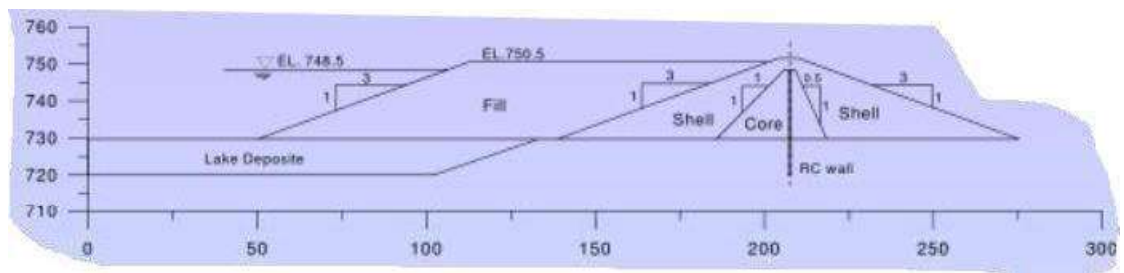


Foto aerea della diga



Sezione trasversale



Fessura causata dall'evento sismico

BIBLIOGRAFIA:

- Stefania Sica and Luca Pagano - Performance-Based Analysis of Earth Dams: Procedures and Application to a Sample Case;
- J. C. Chern – Geotechnical Engineering Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Inc - Seismic Performance Analysis of Earth Dam – Case Studies During Chi-Chi Earthquake.

Nome della diga		Lantan dam
Paese		Taiwan
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Earth core rockfill dam Altezza della diga: 31 m Anno di costruzione: 1944
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	21 settembre 1999, Chi-Chi (Taiwan)
	Distanza epicentro – diga (km)	61
	Magnitudo (M_L o M_W)	7.6
	Profondità (km)	-
	a_{max} registrata alla diga (g)	0.25
	Livello di invaso (m s.l.m.) durante l'evento sismico	-
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Cedimento: 2.5 cm (0.08% of H) Fessura longitudinale in cresta di lunghezza pari a 50 m
Provvedimenti adottati		-

Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico



Foto aerea della diga

BIBLIOGRAFIA:

- Stefania Sica and Luca Pagano - Performance-Based Analysis of Earth Dams: Procedures and Application to a Sample Case;
- R. G. Charlwood, T. E. Little, J. K. Lou – A Review of the Performance of two Larger Dams during the Chi Chi Taiwan Earthquake.

Nome della diga		Wushantou dam
Paese		Taiwan
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Semi-hydraulic fill Altezza della diga: 56 m Sviluppo del coronamento: 1273 m Anno di costruzione: 1920-1930
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	21 settembre 1999, Chi Chi (Taiwan)
	Distanza epicentro – diga (km)	89
	Magnitudo (M_L o M_W)	7.6
	Profondità (km)	-
	a_{max} registrata alla diga (g)	0.1
	Livello di invaso (m s.l.m.) durante l'evento sismico	-
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Cedimento: 2.8 cm
Provvedimenti adottati		-

Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico



Fig. 1 Schematic Illustration for Semi-hydraulic Fill Construction



Photo 1 Embankment Construction: Material dumping and Water Jet Washing

Sezione tipologica trasversale e costruzione dell'opera



Vista da valle dello sbarramento

BIBLIOGRAFIA:

- Stefania Sica and Luca Pagano - Performance-Based Analysis of Earth Dams: Procedures and Application to a Sample Case.

Nome della diga		Yunhoshan (Hushan) dam
Paese		Taiwan
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Earthfill Altezza della diga: 75 m Sviluppo del coronamento: 1657 m Anno di costruzione: 2002-2015
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	21 settembre 1999, Chi Chi (Taiwan)
	Distanza epicentro – diga (km)	37
	Magnitudo (M_L o M_W)	7.6
	Profondità (km)	-
	a_{max} registrata alla diga (g)	0.1
	Livello di invaso (m s.l.m.) durante l'evento sismico	-
Danni riscontrati (o assenza di danni)		-
Provvedimenti adottati		-

Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico



Vista da valle dello sbarramento



Sbarramento e opere di scarico superficiali, vista frontale



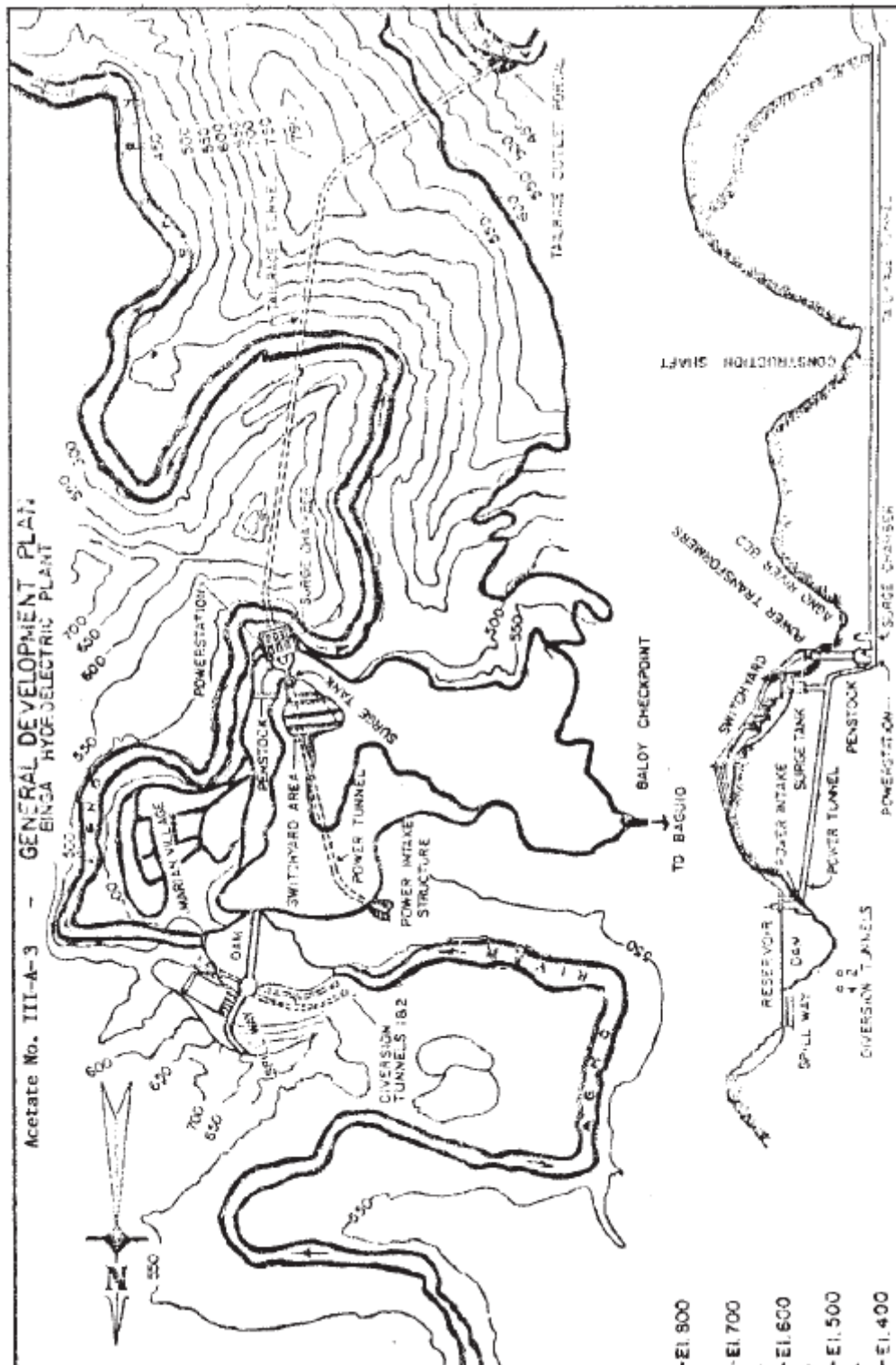
Sbarramento e opere di scarico superficiali, vista laterale

BIBLIOGRAFIA:

- Stefania Sica and Luca Pagano - Performance-Based Analysis of Earth Dams: Procedures and Application to a Sample Case.

Nome della diga		Binga dam
Paese		Filippine
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Si tratta di una diga in rockfill con nucleo in argilla inclinato alta 102m. I contronuclei sono realizzati mediante dumped rockfill. Altri elementi del progetto sono uno scarico con scivolo, una condotta di presa e di produzione idroelettrica e una centrale idroelettrica interrata. La diga Binga dam entrò in operatività nel 1960.
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	16 luglio 1990, Isola di Luzon (Filippine)
	Distanza epicentro – diga (km)	15
	Magnitudo (M_L o M_W)	7.7
	Profondità (km)	-
	a_{max} registrata alla diga (g)	0.60
	Livello di invaso (m s.l.m.) durante l'evento sismico	575m s.l.m. (massimo livello di regolazione), successivamente ridotto rapidamente a 555m s.l.m..
Danni riscontrati (o assenza di danni)		La rapida riduzione del livello di invaso pare abbia contribuito ad alcuni danni riscontrati sul paramento di monte della diga. I principali danni: - fessure longitudinali sul paramento di monte di 100m di lunghezza e fino a 30cm di larghezza; - i cedimenti dei contronuclei hanno determinato fessure in prossimità della creta sia a monte che a valle; - le tensioni di trazione, determinate da cedimenti differenziali indotti dal cambio della geometria della fondazione in spalla destra, hanno prodotto fessure diagonali nel coronamento; - cedimenti differenziali hanno determinato tensioni di trazione al contatto con lo sfioratore che hanno causato fessure trasversali nel coronamento; - inoperatività della paratoia dello scarico n.2.
Provvedimenti adottati		A seguito dell'evento sismico il livello di invaso fu rapidamente ridotto di diversi metri al giorno fino alla quota di 555m s.l.m. alla quale fu effettuata la prima ispezione post sisma. Riparazioni sono state fortemente raccomandate.

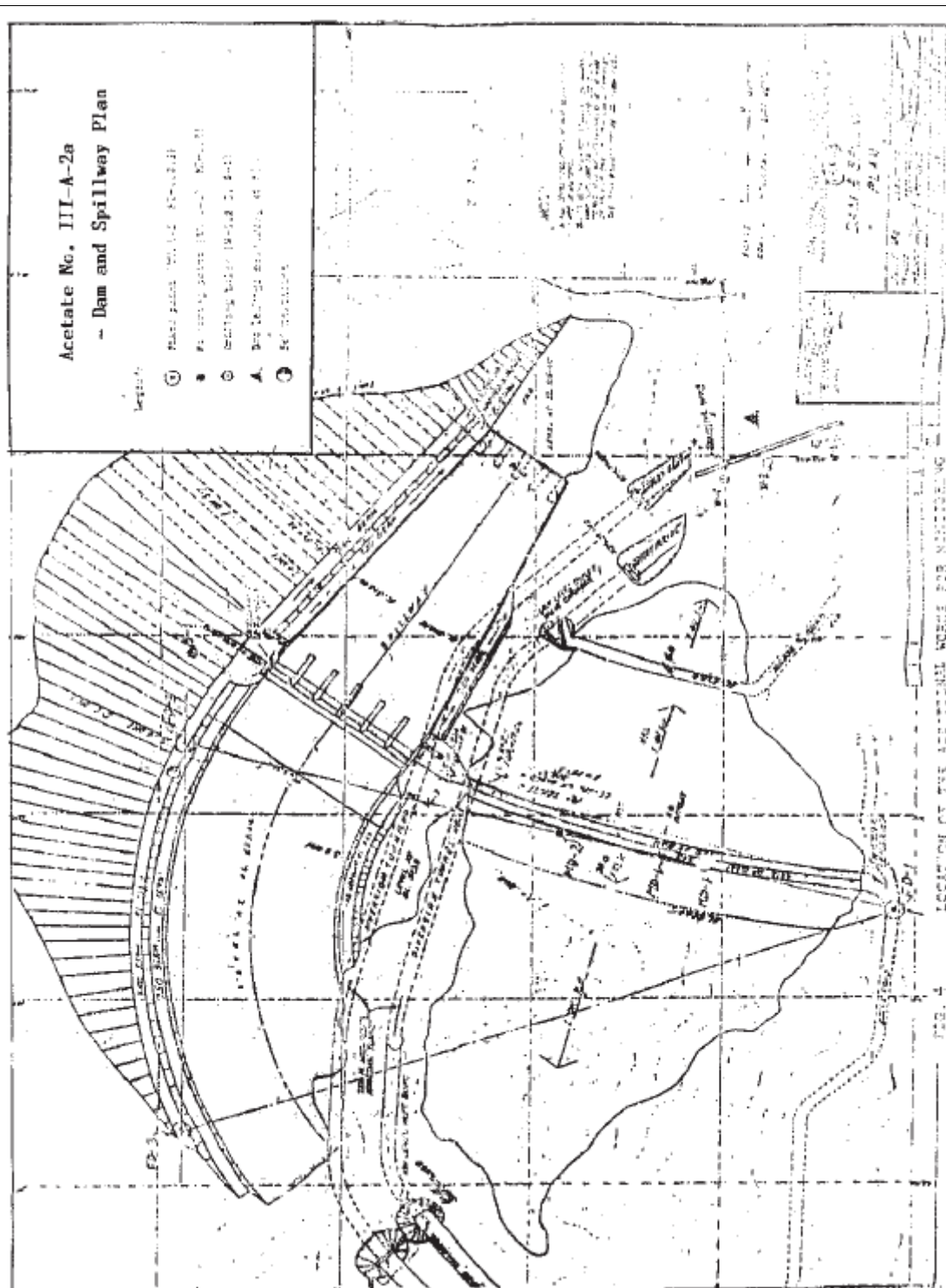
Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico



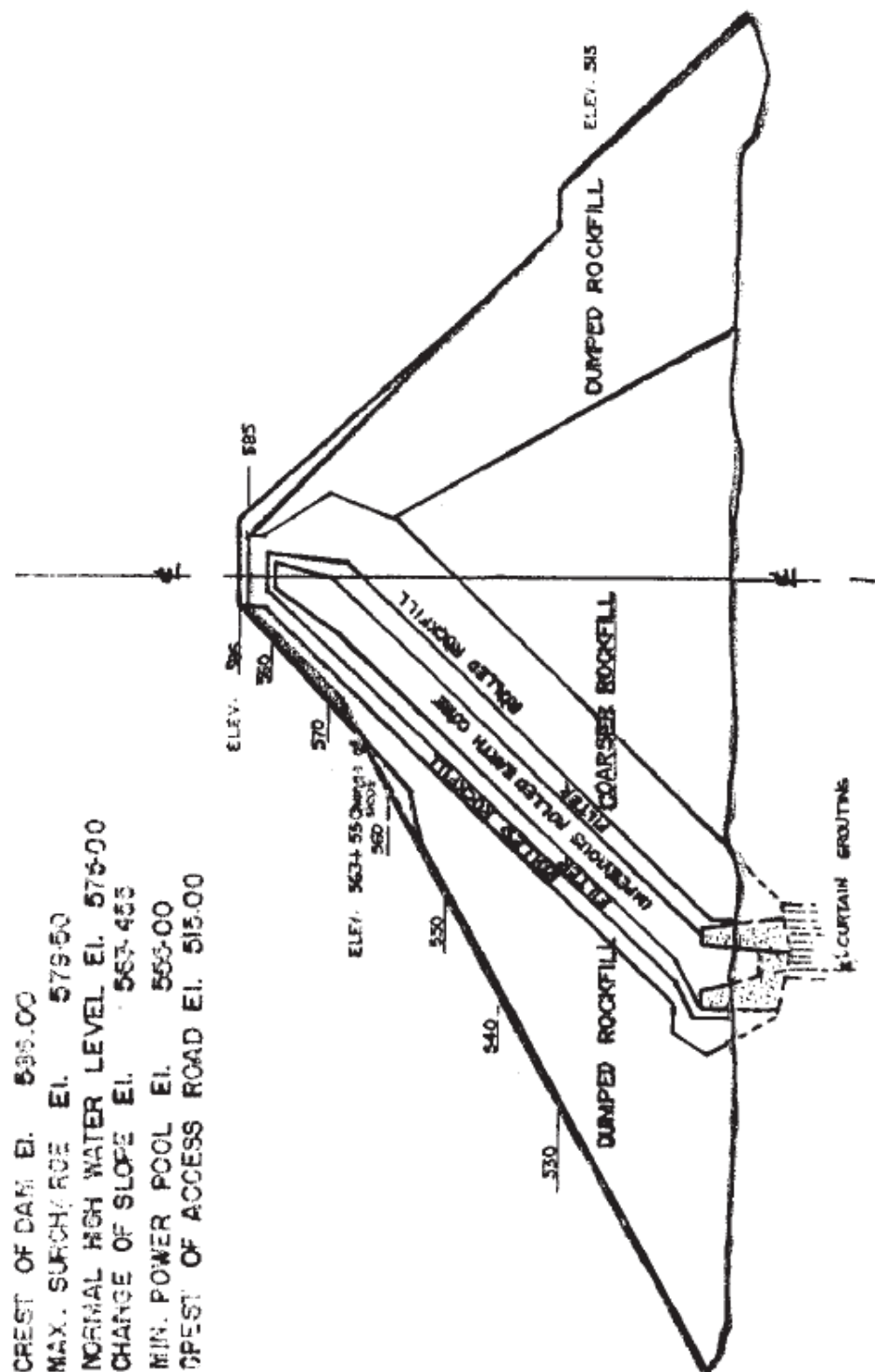
Sviluppo del sistema idroelettrico della diga di Binga



Foto aeree della diga di Binga



Layout della diga di Binga



Massima sezione della diga di Binga

BIBLIOGRAFIA:

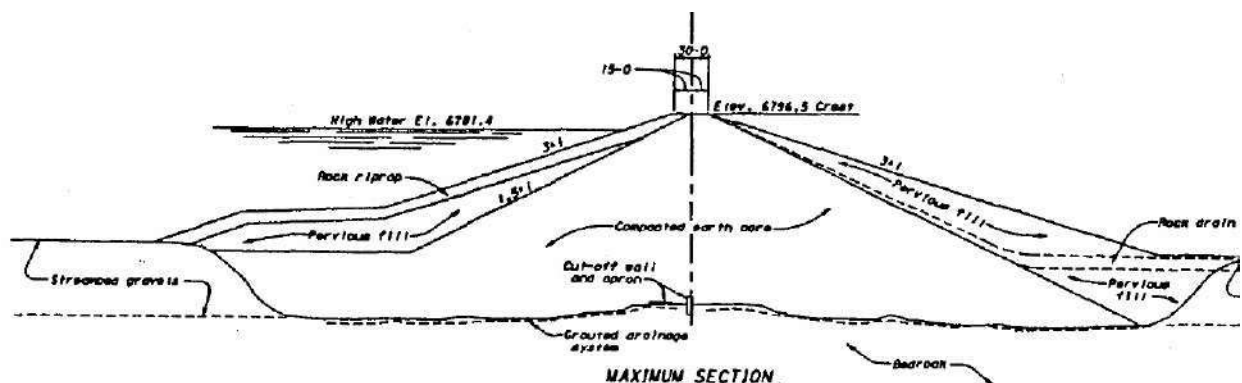
- EQE Engineering (1990), "The July 16, 1990 Philippines Earthquake," A Quick Look Report, August, 48 pp.;
- Swaisgood, J.R.; Au-Yeung, Y. (1991), "Behavior of Dams During the 1990 Philippines Earthquake," Association of State Dam Safety Officials, San Diego, California, pp. 296-314;
- "Observed Performance of Dams During Earthquakes", Volume II, USCOLD (2000).

Nome della diga		Long Valley dam
Paese		California
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga in terra zonata Scopo primario: bacino di raccolta e regolazione delle acque. Anno di costruzione: tra il 1930 e il 1941 Ubicazione: Contea di Mono, California. 30 km a Nord di Bishop e 320 km a est di San Francisco. Altezza massima: 55.2 m Sviluppo e quota del coronamento: 183m (2071.5 m s.l.m.)
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	9 sismi tra il 1978 e 1986. Il più significativo occorso il 27.05.1980
	Distanza epicentro – diga (km)	-
	Magnitudo (M_L o M_W)	6.2
	Profondità (km)	N.D.
	a_{max} registrata alla diga (g)	0.52 g in mezzeria, cresta, direzione spalla-spalla 0.99 g in spalla sinistra, cresta, direzione monte-valle 0.24 g al bedrock, a valle diga
	Livello di invaso (m s.l.m.)	-
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Modesti. Alcune fessure disposte in direzione trasversale, in prossimità delle spalle con profondità centimetriche. Alcuni smottamenti e frane di materiale roccioso sono state rilevate in prossimità delle spalle e lungo il canyon a valle.
Provvedimenti adottati		Nessuno
Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico Il nucleo della diga è costituito da materiale sciolto omogeneo e compattato. I rinfianchi sono costituiti da blocchi lapidei di piccola taglia mentre la parte più esterna è costituita da blocchi lapidei di media e grossa taglia (scogliera). La costruzione della diga fu iniziata dal Dipartimento dell'Acqua di Los Angeles alla fine degli anni '30 per lo stoccaggio delle acque e per la regolazione delle portate idriche. La costruzione fu completata nel 1941. Nel 1965, 1968, 1973, 1974 e 1986 furono apportate modifiche a causa delle elevate infiltrazioni rilevate in corrispondenza delle spalle e in corrispondenza del sistema di drenaggio di valle. Lo scarico di fondo è costituito da una galleria in pressione seguito da una condotta forzata e un canale a pelo libero.		

Lo scarico di superficie, ubicato in spalla sinistra, permette di esitare una portata di circa 100 m³/s.



Diga di Long Valley. Vista generale



Diga di Long Valley. Sezione maestra

Studi di carattere geologico hanno evidenziato che l'area della diga è soggetta a terremoti sia di origine vulcanica sia di origine tettonica; molti eventi recenti possono essere ascrivibili ad una combinazione dei due processi.

La diga di Long Valley è ubicata a soli 4.5 km a sud-est della caldera di Long Valley e a circa 5 km a nord est della traccia superficiale del sistema di faglie attive della Sierra Nevada.

La caldera si è formata circa 1.000.000 di anni fa a seguito dello sprofondamento di parte di un edificio vulcanico all'interno della camera magmatica (~600 km³ di magma eruttato). Evidenze geologiche e le tracce di faglia hanno permesso di verificare che numerosi terremoti con magnitudo superiore a 6.5 hanno prodotto dislocamenti superficiali negli ultimi 20.000 anni.

Tra il 1978 e il 1986 l'area dove è ubicata la diga, è stata oggetto di continue scosse di magnitudo da bassa a moderata. In particolare si sono verificati:

- 26 terremoti con $M_w \geq 5.0$
- 6 terremoti con $M_w \geq 6.0$ associati anche a risalita del livello nel lago della caldera (questo evidenzia la possibilità di una ripresa dell'attività vulcanica)

Nel 1975, nell'ambito del programma nazionale di potenziamento delle rete accelerometrica, furono installati in totale 9 accelerometri disposti sia sul corpo diga sia in prossimità dell'opera; nel 1979 la rete venne potenziata portando gli strumenti installati a 22.

Nella tabella seguente sono riportati le accelerazioni massime registrate (alcune di queste riferiscono a dati registrati e non elaborati).

Si è osservato che in genere, le accelerazioni registrate in corrispondenza della spalla sinistra, al di sopra della cresta, presentano valori superiori rispetto a quelli registrati da altri strumenti a causa di probabili effetti locali di amplificazione topografica e stratigrafica.

Earthquake Date and Time (yr mo day hr min) GMT	Event Magnitude ML	Recorded Peak Accelerations (g)			
		Center Crest of Dam	Left Toe of Dam in Tunnel (Rock)	Left Abut at Crest Elev (Rock)	Left Abut Ridge (above Dam Crest)
78.10.04.16.42	5.8	0.17 L	-----	-----	0.26 L
80.05.25.16.33	6.1	0.23 T,L	0.08 V	0.13 L	0.42 L
80.05.25.16.49	6.0	0.06 L	0.04 L	-----	0.19 L
80.05.25.19.44	6.1	0.24 L	0.11 L	0.09 L	0.49 L
80.05.27.14.50	6.2	0.52 T	0.24 L	0.21 T	0.99 L
81.09.30.11.53	5.9	0.11 L	0.07 L	0.09 L	0.12 L
83.01.07.01.38	5.4	0.13 L	0.06 L	-----	0.08 L
84.11.23.18.08	6.1	0.08 L	-----	-----	0.08 T,L
86.07.21.14.42	6.5	0.21 L	0.10 L	0.08 V,L	0.34 L

Notes:

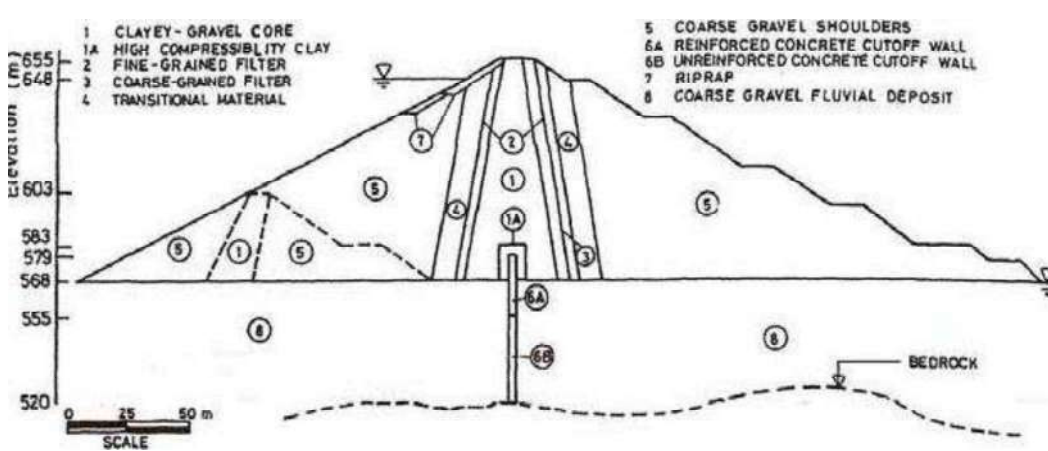
- a) GMT = Greenwich Mean Time
- b) T = acceleration transverse to dam axis
- c) L = acceleration parallel to axis (longitudinal acceleration)
- d) V = vertical acceleration
- e) ML = Local Magnitude, from University of California, Berkeley seismograph station

Riferimenti

-

BIBLIOGRAFIA:

- USCOLD, "Observed Performance of Dams During Earthquakes", VI, July 1992.

Nome della diga		Melado Dam
Paese		Cile
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		La Melado Dam è stata completata nel 1991 al fine di servire una centrale idroelettrica di 500MW di potenza di cui è proprietaria la Empresa Electrica Pehuenche S.A.. La diga è del tipo in terra zonata con nucleo centrale e paramenti in ghiaia, è caratterizzata da un'altezza di 90m e una lunghezza di 310m. I paramenti sono stati compattati raggiungendo l'85% della densità relativa mentre il nucleo il 95% della prova Proctor Standard. Lo sbarramento è costituito da 3.65 milioni di m³ di materiali fondati su uno strato di profondità variabile da 50 a 75m di ghiaia fluviale. (Nogurea; 2010, Rodriguez-Roa, 1992).
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	27 febbraio 2010 – Maule (Chile)
	Distanza epicentro – diga (km)	200 (S36.027° W72.384°)
	Magnitudo (M _L o M _W)	8.8
	Profondità (km)	30
	a _{max} registrata alla diga (g)	0.15 (stimata)
	Livello di invaso (m s.l.m.)	-
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Apertura di fessure longitudinali nella parte alta della diga, sembra causato principalmente dal materiale argilloso del nucleo piuttosto che dal paramento di monte in ghiaia.
Provvedimenti adottati		-
Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico		
 Sezione tipica di progetto della Melado Dam (Rodriguez-Roa, 1992)		



Fotografia da valle (da Vicini).



Fessurazione longitudinale in cresta nel lato del paramento di monte (Noguera, 2010)

BIBLIOGRAFIA:

- Elnashai, Amr; Gencturk, Bora; Kwon, Oh-Sung; Al-Qadi, Imad; Hashash, Youssef; Roesler, Jeffery; Kim, Sung Jig; Jeong, Seong-Hoon; Dukes, Jazalyn and Valdivia, Angharad (2010), "The Maule (Chile) Earthquake of February 27, 2010: Consequence Assessment and Case Studies," Mid-America Earthquake Center <http://mae.cee.uiuc.edu/publications/2010/10-04.htm>;
- Noguera, Guillermo (2010), "Dam Performance during the Cauquenes (Chile) Earthquake 27/02/2010," presentation to ICOLD Committee on Seismic Aspects of Dam Design, Hanoi, Vietnam, May 24, 2010;
- Rodriguez-Roa, F.; Noguera, G. and Osorio, J.L. (1992), "Seismic Analysis of Melado Dam"; Earthquake Engineering Tenth World Conference, Balkema Rotterdam ISBN 90 5410 060 5, http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/10_vol8_4727.pdf Vinci Construction, "Grand Projects - Melado Dam," <http://www.vinci-constructionprojets.com/projets.nsf/en/type-of-works.htm?openagent&r=Melado%20dam>;
- "Observed Performance of Dams During Earthquakes", Volume III, USCOLD (2014).

Nome della diga		Coihueco dam
Paese		Cile
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga zonata con nucleo centrale in limo, contro nuclei e filtri in sabbia e ghiaia. Scopo primario: irrigazione Capacità di invaso: 29.2Mlm ³ Anno di costruzione: 1964-1970 Ubicazione: 35km dalla città di Chillan Altezza massima: 31m Sviluppo del coronamento: lungo 1040m e largo 5m
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	27 febbraio 2010 – Maule (8km dalla costa cilena)
	Distanza epicentro – diga (km)	138 km
	Magnitudo (M_L o M_W)	8.8
	Profondità (km)	-
	a_{max} registrata alla diga (g)	0.57g (stimata con la legge di attenuazione di Martin y Saragoni 2005)
	Livello di invaso (m s.l.m.)	Livello non noto durante il sisma, ma presente perché dopo l'evento è stato abbassato.
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Una porzione del paramento di monte ha subito deformazioni significative e il coronamento mostra fessure, in spalla destra si sono concentrati i maggiori cedimenti raggiungendo valori fino a 4m.
Provvedimenti adottati		Tre ispezioni da parte dell'autorità di controllo a seguito dell'evento sismico, il livello di invaso è stato abbassato per eseguire rilievi LIDAR.

Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico

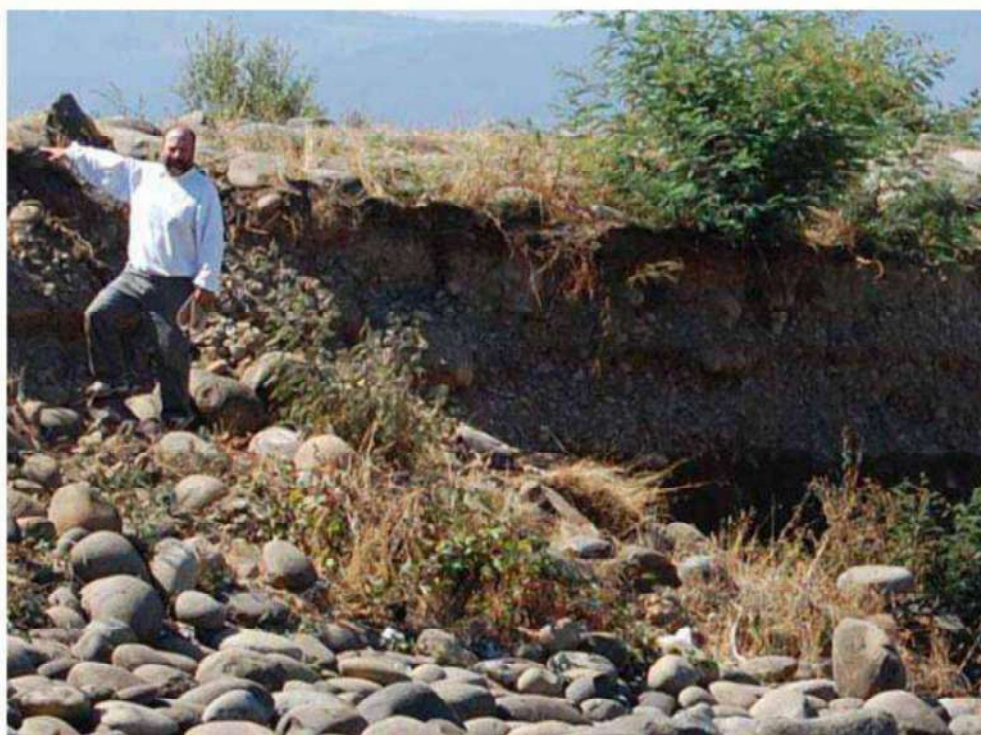
A seguito dell'evento sismico sono state eseguite tre ispezioni da parte dell'autorità di controllo. Nessuna fessura si è manifestata nella parte più alta della diga. Durante le ispezioni si sono cercate, senza trovarne, potenziali zone di liquefazione. È stato eseguito un rilievo LIDAR per confrontare il volume franato con quello presente al piede del paramento. È stato eseguito un sondaggio in corrispondenza del massimo livello di regolazione, avendo abbassato preventivamente il livello del bacino, ed è emerso che i terreni sono a grana fine, principalmente argille di origine vulcanica. La profondità massima delle fessure è di ca. 2m. La perdita di resistenza dei materiali a grana fine sottostanti le arginature, dovuta alle scosse del terremoto, sembra essere la causa più probabile dello scivolamento e forse anche della fessurazione del coronamento.



Vista aerea pre-sisma del bacino (da Bray et al., 2010).



Cedimento A – vicino alla scarpata della spalla sinistra sul coronamento della diga e rigonfiamento in basso a destra nella foto (da Bray et al., 2010).



Primo piano della scarpata (da Bray et al., 2010).



Cedimento A – Rigonfiamento (da Bray et al., 2010).



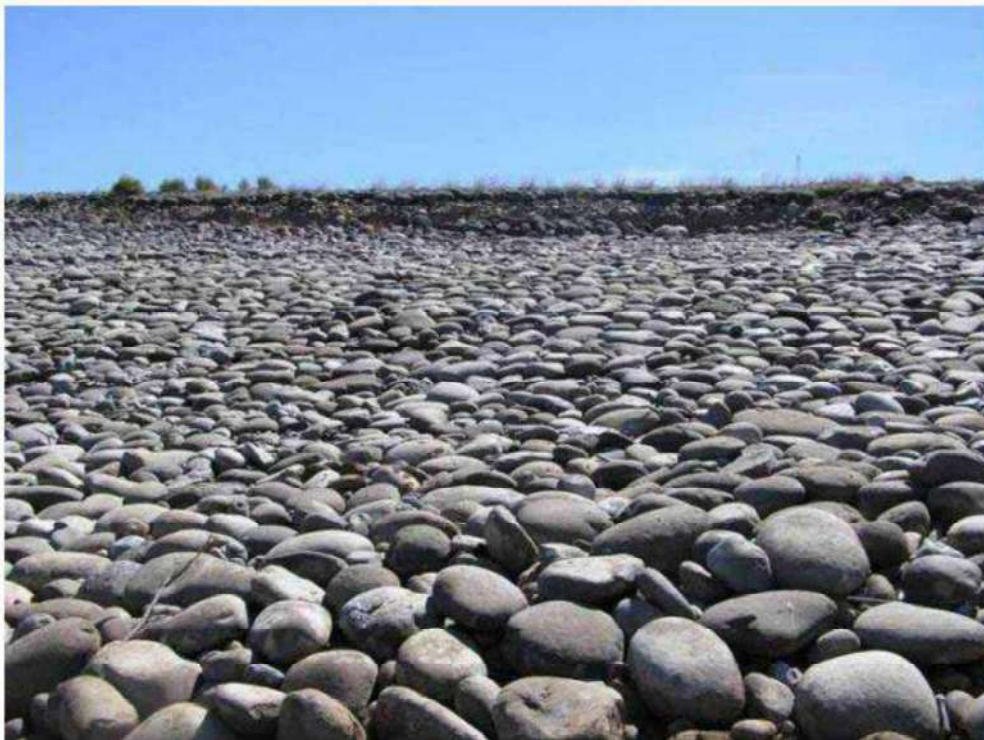
Scarpata e rigonfiamento (da Bray et al., 2010).



Vista laterale del rigonfiamento (da Bray et al., 2010).



Cedimento B – Situato a destra della parte più alta dell'argine (da Bray et al., 2010).



Cedimento B – Vista dal suo piede (da Bray et al., 2010).



Cedimento C – vista dal lato destro dell'argine (da Bray et al., 2010).



Fessure del coronamento (da Bray et al., 2010).



Fessurazione del coronamento vicino alla sponda destra dell'arginatura (da Bray et al., 2010).



Diga a sella (da Bray et al., 2010).



Fessura sul coronamento della diga a sella (da Bray et al., 2010).

BIBLIOGRAFIA:

- USCOLD. Observed performance of dams during Earthquakes. V2. Oct. 2000
- Bray, Jonathan; Elderidge, Terry; Frost, David; Hashash, Youssef; Kayen, Robert; Ledezma, Christian; Moss, Robb and Verdugo, Ramon (2010), "Geo-Engineering Reconnaissance of the February 27, 2010 Maule, Chile Earthquake, Version 2: May 25, 2010, Geotechnical Extreme Events Reconnaissance," Sections 11 & 15 www.geerassociation.org/Post_EQ_Reports.html

- Elnashai, Amr; Gencturk, Bora; Kwon, Oh-Sung; Al-Qadi, Imad; Hashash, Youssef; Roesler, Jeffery; Kim, Sung Jig; Jeong, Seong-Hoon; Dukes, Jazalyn and Valdivia, Angharad (2010), "The Maule (Chile) Earthquake of February 27, 2010: Consequence Assessment and Case Studies," Mid-America Earthquake Center <http://mae.cee.uiuc.edu/publications/2010/10-04.htm>
- Noguera, G. (2010), "Maule Earthquake," a presentation to ICOLD Committee on Seismic Aspects of Dam Design, Hanoi, Vietnam, May 24, 2010;
- Luis Valenzuela P., Ramón Verdugo A., José Campaña Z., Carmen G. Opazo A., Safety performance of dams in Chile highly seismic environment", Dam World 2020.

Nome della diga		Colbun dam
Paese		Cile
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		La Colbun dam è una diga di 116m di altezza e ha uno sviluppo di 550m, costituita da 13.9MI di m³ di terreno. L'elemento di tenuta è un nucleo di argilla sabbiosa inclinato e ha dei paramenti in ghiaia compattata. Il terreno di fondazione è di tipo fluviale con uno spessore di circa 68m. Nella diga è presente un cut-off in calcestruzzo per controllare la filtrazione dell'acqua nello strato di fondazione. L'invaso della diga contiene circa 1500MI di m³ d'acqua provenienti dal fiume Maule. La diga fa parte della centrale idroelettrica Colbun-Machicura ed è stata completata nel 1985.
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	27 febbraio 2010 – Maule (Chile)
	Distanza epicentro – diga (km)	183 (S36.027° W72.384°)
	Magnitudo (M _L o M _W)	8.8
	Profondità (km)	30
	a _{max} registrata alla diga (g)	La PGA alla diga è stata registrata in 0.37g nel tunnel in roccia. L'accelerazione verticale massima fu all'incirca il 50% più alta dell'accelerazione massima orizzontale.
	Livello di invaso (m s.l.m.)	-
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Un condotto elettrico posizionato in corrispondenza della cresta sul lato di valle ha subito spostamenti di 2m in orizzontale e 1m in verticale ma gli inclinometri posizionati lungo il paramento di valle non hanno riportato deformazioni dovute al terremoto. Il resto della diga ha subito spostamenti minori dell'ordine dei 10cm. Fessurazione trasversali lungo la cresta avevano uno spessore massimo di 1cm che scompariva già alla profondità di 3m. Non ci sono stati rilevanti misurazioni nei piezometri di Casagrande posti sulla diga.
Conclusioni e Provvedimenti adottati		La diga di Colbun si è comportata adeguatamente durante l'evento sismico. Le fessurazioni trasversali occorse sulla cresta della diga non si sono sviluppate fino ad una profondità di 3m comunque minore del franco libero. Lo spostamento del condotto elettrico sembra essere stato causato dalle alte accelerazioni alla cresta della diga.

Sfortunatamente non ci sono misurazioni delle accelerazioni a disposizione.

Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico



Vista dall'alto della diga di Colbun



Vista da valle (da chile.com)



Spostamento del condotto elettrico in cresta (Noguera, 2010)



Fessurazione longitudinale in cresta nel lato del paramento di monte (Noguera, 2010)

BIBLIOGRAFIA:

- Elnashai, Amr; Gencturk, Bora; Kwon, Oh-Sung; Al-Qadi, Imad; Hashash, Youssef; Roesler, Jeffery; Kim, Sung Jig; Jeong, Seong-Hoon; Dukes, Jazalyn and Valdivia, Angharad (2010), "The Maule (Chile) Earthquake of February 27, 2010: Consequence Assessment and Case Studies," Mid-America Earthquake Center <http://mae.cce.uiuc.edu/publications/2010/10-04.htm>;
- Noguera, Guillermo (2010), "Dam Performance during the Cauquenes (Chile) Earthquake 27/02/2010," presentation to ICOLD Committee on Seismic Aspects of Dam Design, Hanoi, Vietnam, May 24, 2010;

- Rodriguez-Roa, F.; Noguera, G. and Osorio, J.L. (1992), "Seismic Analysis of Melado Dam"; Earthquake Engineering Tenth World Conference, Balkema Rotterdam ISBN 90 5410 060 5, http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/10_vol8_4727.pdf Vinci Construction, "Grand Projects - Melado Dam," <http://www.vinci-constructionprojets.com/projets.nsf/en/type-of-works.htm?openagent&r=Melado%20dam>;
- "Observed Performance of Dams During Earthquakes", Volume III, USCOLD (2014).

Nome della diga		Darbandikhan Dam
Paese		Iraq
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga in materiali sciolti, con nucleo di tenuta in argilla ad alta plasticità e contronuclei in pietrame. Gli strati filtranti addossati al nucleo hanno uno spessore di circa 3,0 m. Altezza: 128 m. Coronamento: sviluppo: 445 m; larghezza: 17 m; quota: 495,0 m s.l.m. Volume di invaso (alla quota di massima regolazione): 3'000 Mlmc. Utilizzi principali: irriguo, laminazione, idroelettrico. Periodo di costruzione: 1956-1961.
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	22/11/2017 - Sarpol-e Zahab earthquake
	Distanza epicentro - diga (km)	32 km
	Magnitudo (M_L o M_W)	$M_W = 7,3$
	Profondità (km)	23,4 km
	a_{max} registrata alla diga (g)	0,356 g (nessun accelerometro istallato; valore stimato con la formula di Esteve & Rosenblueth)
	Durata	30 s
	Livello di invaso (m s.l.m.)	471,9 m s.l.m.
Danni riscontrati (o assenza di danni)		- Fessurazioni longitudinali all'interfaccia nucleo-contronuclei lungo il coronamento; - Fessurazione all'interfaccia sfioratore laterale - rilevato, di profondità non quantificata; Fessurazioni trasversali lungo il coronamento, estese in profondità fino al materiale granulare a protezione del nucleo; - Incremento delle perdite fino al 300%; - Caduta massi sul coronamento e sullo sfioratore laterale.
Provvedimenti adottati		Abbassamento del livello idrico.

Immagini e informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico

La Darbandikhan dam è una diga in materiali sciolti, alta 128 m, con nucleo di tenuta in argilla ad alta plasticità e contronuclei in pietrame. Gli strati filtranti addossati al nucleo hanno uno spessore di circa 3,0 m.



Figura 1: Darbandikhan Dam: vista aerea e viste da valle.

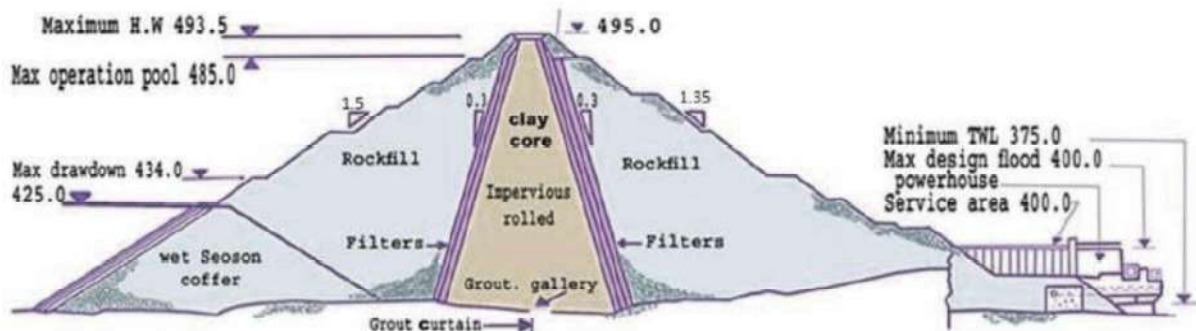
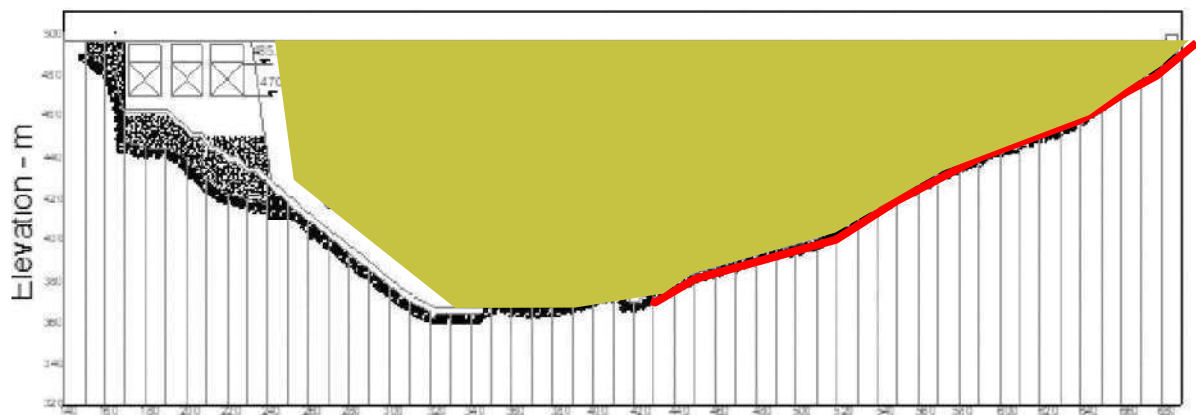


Figura 2: Sezione trasversale della diga in corrispondenza della sezione maestra.



Sezione longitudinale della diga.

Sulla diga sono presenti due gallerie di ispezione e raccolta drenaggi, realizzate al di sopra del bedrock. Le gallerie, una destra e l'altra sinistra, si addentrano nelle rispettive spalle per circa

200 m, risultando tra loro distanziate di circa 75 m nella parte centrale. La sezione superiore della galleria destra è incorporata all'interno della struttura dello sfioratore laterale.

Per quanto attiene agli organi di scarico, la diga è dotata di uno sfioratore laterale in sponda destra, cui sono asservite n.3 paratoie a settore di capacità complessiva pari a 5700mc/s. Lo scarico di fondo è costituito da n.3 condotte di diametro 4,3 m e capacità complessiva 261mc/s. La derivazione idroelettrica si compone di una torre di presa ubicata a sinistra dello sfioratore laterale che, per mezzo di n.2 condotte di diverso diametro, alimenta la centrale idroelettrica al piede della diga stessa.

Dopo i primi invasi sperimentali, presso la diga si riscontrarono diverse problematiche.

Tra il 1961 ed il 1962, un cedimento inatteso particolarmente rilevante si verificò nella zona di contatto tra la presa idroelettrica e lo sfioratore laterale. Nel 1973 il cedimento veniva quantificato in 1,08 m e nel 1976 la sua causa veniva ricondotta al processo di consolidazione che aveva interessato il materiale argilloso in quel particolare punto. I relativi lavori di riparazione furono eseguiti nel 1980 ed ulteriori interventi si resero necessari nel 2001 per regolarizzare la superficie del coronamento dove con le piogge si creavano ristagni ed un progressivo aggravio della problematica; venne dunque ricostruita la strada asfaltata, i relativi cordoli e la barriera di sicurezza laterale.

Nel 1967, cinque anni dopo il primo riempimento, venne alla luce una superficie di scorrimento di circa 100 m in corrispondenza del paramento di monte. Questa ed altre superfici di scorrimento minori sono state oggetto, nel corso degli anni successivi, di ripetuti interventi di riparazione.

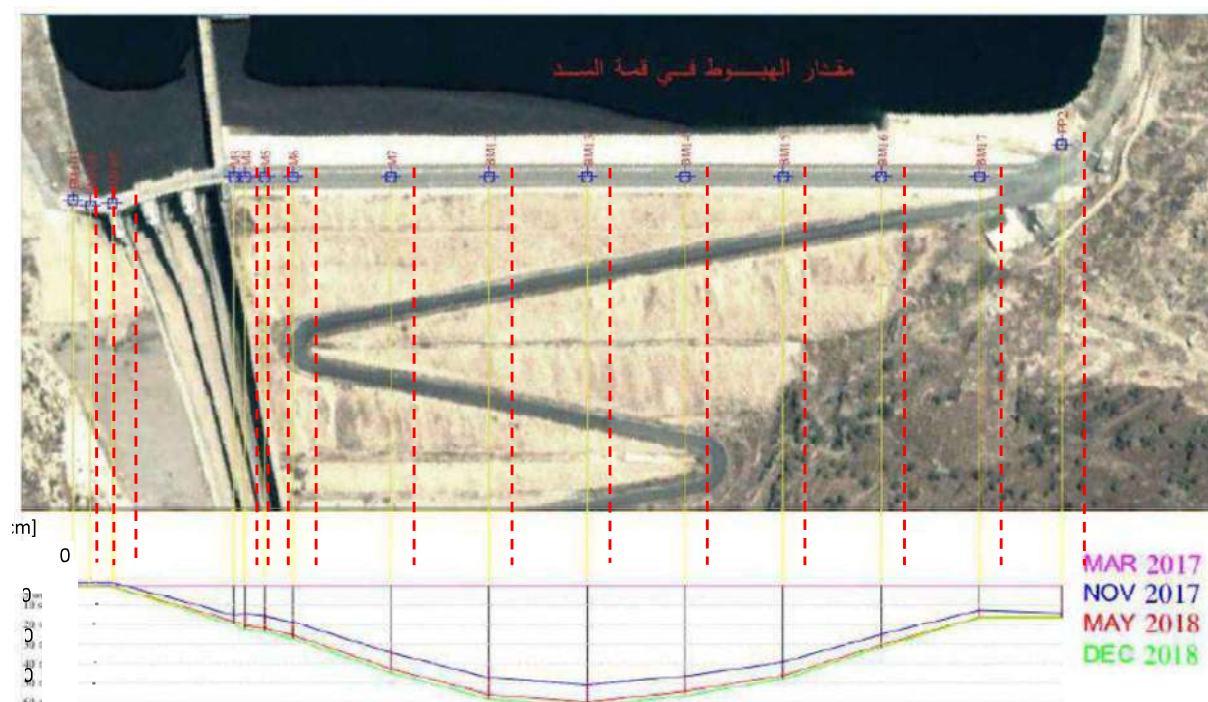
Nel novembre 1967 è stata identificata una superficie di scorrimento anche in sponda destra, circa 300 m a monte dello sbarramento. L'area interessata consisteva in circa 2 Mm³ di materiale e si sviluppava approssimativamente per 350 m in lunghezza e 200 m in larghezza. A seguito di un periodo di piogge intense durate circa 7 giorni, per circa 126 mm cumulati, venne registrato un movimento di circa 1,5 m verso valle ad una quota di invaso pari a circa 455 m s.l.m.. Altri spostamenti della sponda destra si verificarono nel nov.1969 e nel gen.1970. Per la stabilizzazione di questa frana sono stati messi a punto numerosi interventi, alcuni dei quali non ancora completati.

La roccia di fondazione sottostante la diga è stata reiniettata. La protezione in pietrame rip-rap del paramento di monte è stata oggetto di interventi di manutenzione tra il 1999 e il 2000.

Nel 1988, a causa della guerra tra Iran ed Iraq, le paratoie dello sfioratore sono state rimosse, e successivamente reinstallate tra il 1989 ed il 1990. Durante la guerra, lo sfioratore è stato bombardato.

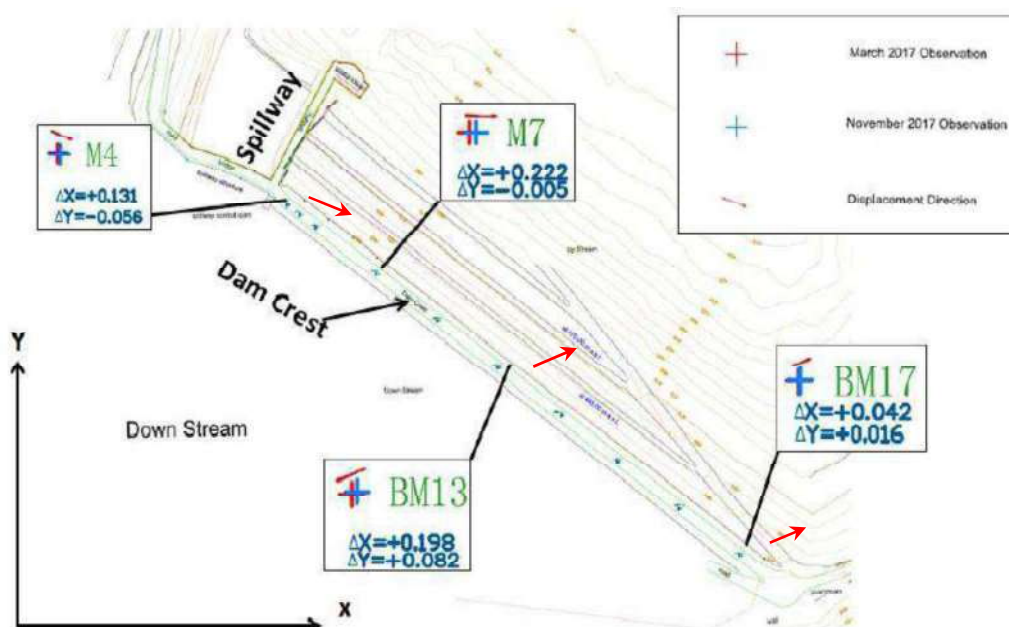
Danni riscontrati

Deformazioni del corpo diga: Subito dopo il terremoto importanti deformazioni apparvero visibili ad occhio nudo. Il cedimento indotto dal terremoto è stato considerevole lungo l'asse della diga, con valore massimo in corrispondenza della sezione trasversale di maggior altezza, quantificabile in circa 48 cm.



Spostamenti verticali lungo lo sviluppo del coronamento indotti dal sisma, nel breve e nel lungo termine.

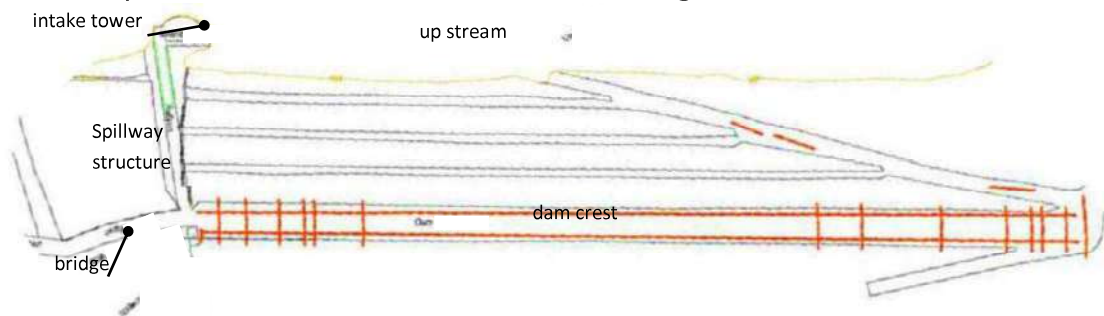
Secondo il monitoraggio topografico effettuato immediatamente dopo il sisma, la diga è stata soggetta a deformazioni irreversibili sismo-indotte anche in direzione orizzontale, con spostamenti massimi quantificabili in circa 22 cm in direzione M/V verso monte, e 13 cm in direzione D/S verso sinistra.



Rappresentazione schematica degli spostamenti orizzontali indotti dal sisma.

Fessure Longitudinali: Le due principali fessure longitudinali hanno interessato l'intero coronamento, sviluppandosi in corrispondenza di ambo i lati di monte e di valle della strada asfaltata; nessuna fessurazione longitudinale è stata riscontrata in mezzzeria. Altre fessure longitudinali, di minor sviluppo, sono state rinvenute sui paramenti.

Il fatto che nessuna fessura longitudinale sia stata osservata in mezzeria ha indotto a ritenere che i contronuclei si siano deformati molto più del nucleo centrale: le due principali fessure sono infatti insorte in corrispondenza dell'interfaccia tra il nucleo in argilla e i due contronuclei laterali.



Quadro fessurativo registrato a seguito del sisma.

Il massimo valore di apertura delle fessure ammonta a circa 15 cm, ed è stato registrato nella parte centrale del coronamento, sul lato di valle. L'apertura delle fessure andava riducendosi all'approssimarsi delle spalle, dove l'altezza della diga è minore.

Sul coronamento, il marciapiede adiacente la strada asfaltata ha subito importanti deformazioni, ed i pali della luce si sono inclinati con angoli compresi tra 20° e 40°.

Allo scopo di verificare l'estensione delle fessure longitudinali e scongiurare la presenza di nicchie di distacco, sono stati scavati numerosi pozzetti esplorativi. Ne è emerso che le fessure erano confinate entro i primi 2,0m di materiale granulare posto a protezione del sottostante nucleo in argilla, senza addentrarsi all'interno di quest'ultimo.

Non è stato rinvenuto alcun segnale legato alla presenza di superfici di scorrimento.



Vista del coronamento a seguito dell'evento sismico.

Fessure trasversali: Per quanto attiene le fessure trasversali, queste risultavano distribuite lungo l'intero sviluppo del coronamento, essendo più ravvicinate in prossimità delle spalle. Anche in questo caso i pozzetti esplorativi realizzati hanno permesso di accertare che tutte le fessure trasversali occorse erano superficiali, si estendevano in profondità per un massimo di 2,0 m e presentavano un'apertura tipicamente inferiore a 3 cm.

Un'unica fessura, insorta in prossimità dell'interfaccia tra lo sfioratore laterale ed il corpo diga, presentava caratteristiche differenti: aveva infatti una larghezza di circa 16 cm e non è stato possibile determinarne la profondità. La sua presenza si è inoltre accompagnata ad un cuneo di approfondimento di larghezza massima pari a 74 cm. Questa fessura, ed il potenziale correlato rischio di fenomeni di erosione interna, ha rappresentato la principale causa di preoccupazione

per le Autorità, che hanno di conseguenza imposto per circa un anno una limitazione di invaso, con il mantenimento del livello idrico circa 25 m sotto il coronamento.



Una fessura trasversale



Fessura in corrispondenza dello sfioratore laterale.

Caduta massi: Il fenomeno di caduta massi dalle sponde, aventi dimensioni da centimetriche a metriche (2,5 m), ha interessato sia il coronamento che lo sfioratore laterale.

Scorrimenti: Nessuna superficie di scorrimento è stata osservata sul corpo diga; alcune frane si sono però manifestate sia in spalla destra che in spalla sinistra.

Lo spostamento massimo è stato registrato in spalla destra, già storicamente interessata da problemi di instabilità e da numerosi interventi di stabilizzazione; la sua entità è stata quantificata in circa 26 cm di scorrimento verso il serbatoio.



Nicchia di distacco ubicata sulla spalla sinistra.

Gallerie di ispezione e raccolta drenaggi: Dopo il terremoto le gallerie sono state trovate in condizioni generalmente buone. La maggior parte delle filtrazioni sono state osservate in corrispondenza delle riprese di getto, sebbene ve ne fossero anche alcune esterne; tuttavia alcune filtrazioni minori dalle riprese di getto si osservavano già prima del sisma.

Sfioratore laterale e organi di scarico: L'intero manufatto dello sfioratore laterale si è spostato circa 11 cm verso valle, in direzione S-O. Tuttavia, sulla base delle ispezioni visive condotte, lo sfioratore non ha subito danni né sono stati osservati fenomeni di fessurazione. Anche le paratoie a settore hanno mantenuto un funzionamento regolare.

Per quanto riguarda l'opera di presa, ivi compresa la torre di presa e gli imbocchi delle gallerie, nessun danno è stato osservato.

Condizioni di filtrazione: La misura delle perdite è eseguita al termine di ciascuna delle due gallerie di drenaggio. Nessuna informazione risulta disponibile per la filtrazione attraverso il nucleo fino al tappeto drenante al piede. Lungo il cunicolo di fondo sono installati 28 piezometri, 13 in destra e 15 in sinistra. Inoltre, 5 celle piezometriche funzionanti sono installate nel nucleo, a diverse profondità e a distanze dallo sfioratore comprese tra 6 e 17 m.

Il giorno successivo al terremoto, si riscontrò un aumento delle perdite, passate da 1,0 l/min a 2,1 l/min in sinistra, e da 1,47 l/min a 5,44 l/min in destra.

I piezometri nel cunicolo destro non hanno mostrato significativi segni di variazione mentre quelli nel cunicolo sinistro hanno esibito comportamenti diversi: alcuni hanno registrato incrementi di quota piezometrica fino a 9,0 m; altri incrementi modesti o nulli.

Per quanto riguarda le celle piezometriche, il giorno successivo al terremoto queste hanno registrato un aumento di quota piezometrica di circa 6,0 m.

Evoluzione dei fenomeni osservati nel tempo: Ad un anno dal sisma, i valori delle perdite continuavano a mantenersi elevati, senza ritornare alla condizione precedente l'evento.

I livelli piezometrici hanno invece iniziato a riportarsi verso valori "normali" già una settimana dopo il sisma. Per quanto riguarda i cedimenti, il loro valore nel tempo è aumentato: se immediatamente dopo il sisma il cedimento massimo era stato quantificato in 48 cm, dopo 13 mesi questo era 61 cm. Per quanto riguarda infine il grado di apertura delle fessure, ad un anno di distanza dal sisma sono state riscontrate solo minime variazioni.

Conclusioni e Provvedimenti adottati

Al momento del sisma il livello idrico nel serbatoio era piuttosto basso (471,9 m s.l.m.), circa 13,0 m al di sotto della quota di massima regolazione (485,0 m s.l.m.) e 23,0 m al di sotto del coronamento. Inoltre, il livello idrico era stato mantenuto basso per i 6 mesi precedenti il terremoto, con presumibili condizioni di parziale saturazione nella parte superiore del corpo diga al momento del sisma.

Il terremoto è stato uno dei più disastrosi che hanno interessato il confine Iraq/Iran dall'inizio del 1900, ed ha provocato circa 500 vittime e 12'000 senza tetto.

Il Massimo Terremoto credibile (*MCE*) per la diga in oggetto è stimato avere le seguenti caratteristiche: $M_w = 6,5$; profondità focale: 15 km. Il terremoto Operativo di Base (*OBE*) invece: $M_w = 6,5$; profondità focale: 7,5 km.

Nella settimana seguente il terremoto, a scopo precauzionale, il livello di invaso è stato gradualmente abbassato di circa 1,90 m.

Sempre a scopo precauzionale è stata evacuata la popolazione residente a valle della diga.

Nell'estate 2019 non era ancora stato adottato alcun provvedimento di tipo "strutturale", se non quello di abbassare il livello del lago.

La diga ha manifestato assestamenti e fessurazioni in corrispondenza delle variazioni di geometria o compressibilità dei materiali (nucleo - contronuclei o cambi di pendenza in fondazione), senza che superfici di scorrimento o innesco di fenomeni di erosione interna si siano manifestati sul corpo diga.

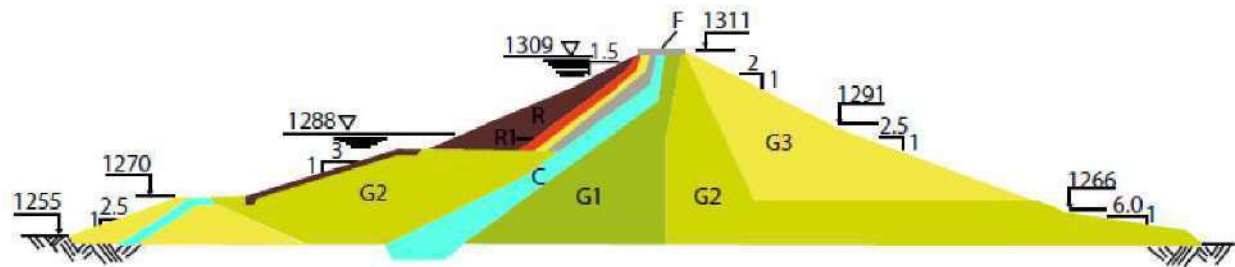
Questo comportamento, da ritenersi soddisfacente, può essere ricondotto da un lato alle caratteristiche costruttive dello sbarramento, ed in particolare alla presenza di nucleo ad elevata plasticità a cui è addossato un consistente pacchetto di strati filtranti, dall'altro al fatto che al momento del sisma il livello idrico nel serbatoio risultava particolarmente basso.

BIBLIOGRAFIA

- Omed S. Q. Yousif, Kawa Zaidn, Younis Alshkane, Abdulrahman Khani, Salar Kareem Hama "Performance of Darbandikhan Dam during a major earthquake on November 12, 2017" - Proceedings of the 3rd Meeting of EWG Dams and Earthquakes An International Symposium -Portugal, Lisbon, LNEC, May 6 - 8, 2019.
- Al-Husseinawi U., Li Z., Clarke P., Edwards S. "Evaluation of the Stability of the Darbandikhan Dam after the 12 November 2017 Mw 7.3 Sarpol-e Zahab (Iran–Iraq Border) Earthquake" - Remote sensing, published: 7 September 2018.
- SMEC International Pty. Ltd., E5137 "Consultacy services for Dokan and Derbendikhan Dam inspections - Inspection Report (Final)" - Luglio 2016.

Nome della diga		Sürgü dam
Paese		Turchia
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga in pietrame Anno di costruzione 1965-1971 Hmax = 57 m (da fondazione più profonda) Lunghezza coronamento = 736 m Volume d'invaso $70.9 \times 10^6 \text{ m}^3$
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	1) 06/02/2023 Turchia: evento principale a 33 km SO di Kahramanmaraş e principale replica a 62 km NO della stessa città 2) 05/05/1986 Turchia vicino alla città di Malatya
	distanza epicentro – diga (km)	1) 111.90 km – 56.83 km 2) 10 km
	magnitudo (M_L o M_W)	1) 7.8 – 7.7 2) 5.9
	profondità (km)	1) 8.6 km – 7.0 km 2) 12.85 km
	$a_{\max}$ registrata alla diga (g)	1) PGA stimata: 0.19 g – 0.50 g 2) PGA stimata: 0.14 g – 0.20 g
	Livello di invaso (m s.l.m.)	1) 1299.98 m s.m. 2) Prossimo alla massima regolazione
Danni riscontrati (o assenza di danni)		1) Fratture in cresta con 5 cm di spostamento verticale e 10-15 cm di spostamento orizzontale. Materiale sporgente lungo il paramento di monte coincidente con le fratture in cresta indica l'instabilità sismica del pendio come causa delle fratture. Danni superficiali alle strutture di scarico (frattura e distacco superficiale di cls) 2) Fratture lungo tutta la cresta vicino al paramento di monte con aperture da 10 a 20 cm. Cedimento della parte di valle della cresta di circa 15 cm nel piano verticale
Provvedimenti adottati		1) – 2) Abbassamento del livello d'invaso di 2m e la geometria della cresta è stata ripristinata con materiale aggiuntivo

Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico



C : Impervious zone
F : Filter
R : Rockfill
R1 : Altered gneiss

G1 : Fractured and altered gneiss
G2 : Fractured gneiss
G3 : Gneiss

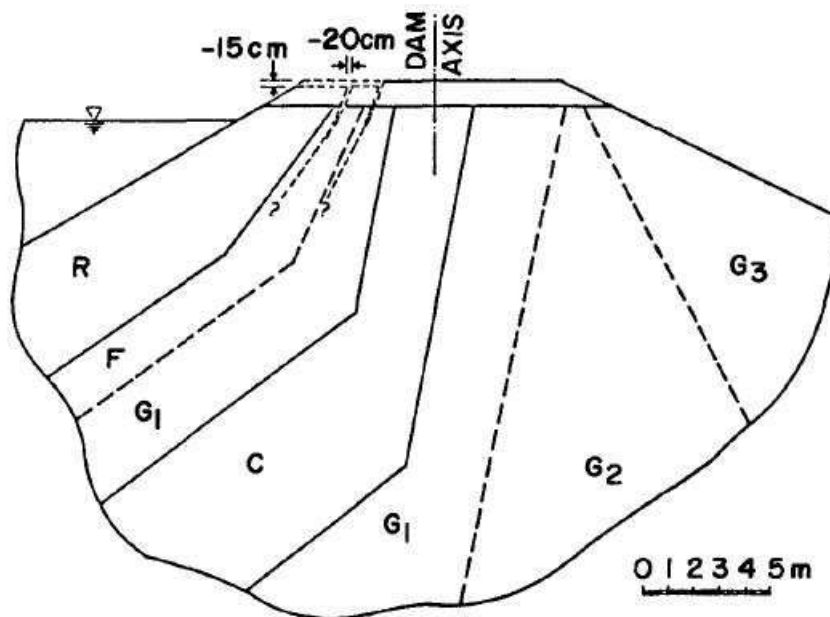
Sezione trasversale



Danni 2023



Danni 1986



- G₁: COMPLETELY DECOMPOSED GNEISS**
(Compacted in 0.2-0.3 m. Layers)
- G₂: COARSE SIZE DECOMPOSED GNEISS**
(Compacted in 0.2-0.3m. Layers)
- G₃: MODERATELY DECOMPOSED COARSE GNEISS**
(Compacted in 0.3-0.45m. Layers)
- C: CORE OF IMPERVIOUS MATERIALS**
(Sandy-Silty Clay Compacted in 0.5m. Layers)
- F: FILTER MATERIAL**
- R: SOUND ROCK (Compacted in 0.9m. Layers)**

Sezione trasversale

BIBLIOGRAFIA:

- Onder Cetin, K., Cuceoglu, F., Ayhan, BU., et al., "Performance of hydraulic structures during 6 February 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake sequence", Earthquake Spectra, 2024;
- EERI LFE Program, "February 6, 2023 Türkiye Earthquakes: report on Geoscience and Engineering Impacts", GEER Association Report 082, May 6 2023;
- Tosun, H., "Stability Analysis of Large Embankment Dams Located on Shear Zones and Case Studies", Hydrovision International Conference, Denver, 2017;
- Ozkan, Y. et al., "Damage at Surgu Dam during May 5, 1986 Malatya Turkey Earthquake", Earthquake Spectra, 1990.

Nome della diga		Sultansuyu dam
Paese		Turchia
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga in materiali sciolti Anno di costruzione 1986-1993 Hmax = 55 m Lunghezza coronamento = 721 m Volume d'invaso $53.3 \times 10^6 \text{ m}^3$
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	06/02/2023 Turchia: evento principale a 33 km SO di Kahramanmaraş e principale replica a 62 km NO della stessa città
	distanza epicentro – diga (km)	83km
	magnitudo (M_L o M_W)	7.5
	profondità (km)	8.6 km – 7.0 km
	$a_{\max}$ registrata alla diga (g)	0.48g
	Livello di invaso (m s.l.m.)	8 m inferiore al livello di massima regolazione
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Fratture lungo il coronamento e il paramento di monte con varie profondità; osservate in cresta fratture con deformazioni laterali maggiori di 2 m e 4 m di profondità. Evidente traslazione dell'unghia di monte della diga e liquefazione del terreno in spalla destra. Cedimenti tra 5 e 30 cm.
Provvedimenti adottati		Svuotamento graduale dell'invaso

Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico





Sulla base delle osservazioni fatte è probabile che i terreni di fondazione, di natura granulare, hanno subito un processo di liquefazione durante la fase più intensa del sisma, destabilizzando il paramento di monte e causando le fratture in cresta e la formazione di fossi e avvallamenti lungo il paramento stesso. Non sono stati osservati danni sulle strutture idrauliche (opera di presa, scarico di superficie e scarico di fondo).

BIBLIOGRAFIA:

- Onder Cetin, K., Cuceoglu, F., Ayhan, B.U., et al., "Performance of hydraulic structures during 6 February 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake sequence", Earthquake Spectra, 2024;
- <https://www.yuksel.net/en/projects/all-projects/dams-a-hepps/126-sultansuyu-baraj-ve-tesisleri-naat-malatya&Itemid=317>;
- EERI LFE Program, "February 6, 2023 Türkiye Earthquakes: report on Geoscience and Engineering Impacts", GEER Association Report 082, May 6 2023;
- JRC Technical Report, "M7.8 and M7.5 Earthquakes in Türkiye and Syria, 8 Feb 2023"

Nome della diga		Ariklikas dam
Paese		Turchia
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga in terra Anno di costruzione 1994-1998 Hmax = 25 m Lunghezza coronamento = 355 m Volume d'invaso $2.2 \times 10^6 \text{ m}^3$
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	06/02/2023 Turchia: evento principale a 33 km SO di Kahramanmaraş e principale replica a 62 km NO della stessa città
	distanza epicentro – diga (km)	45km
	magnitudo (M_L o M_W)	7.8
	profondità (km)	8.6 km – 7.0 km
	$a_{\max}$ registrata alla diga (g)	0.34g
	Livello di invaso (m s.l.m.)	568.5 m s.m.
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Intensa fratturazione del coronamento con larghezza delle fratture da 2.2 a 4m. Scarpate lungo il paramento di monte e bolle di sabbia in prossimità del piede (segno di liquefazione). Nessun danno registrato alle strutture idrauliche eccetto minori fessurazioni dei muri di sostegno dello sfioratore.
Provvedimenti adottati		-

Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico



West Elevation

☉ 119°E (T) • 37.156133, 36.514218 ±2 m ▲ 575 m



18 Feb 2023 10:00:26

South West Elevation

☉ 47°NE (T) • 37.155058, 36.51306 ±2 m ▲ 599 m

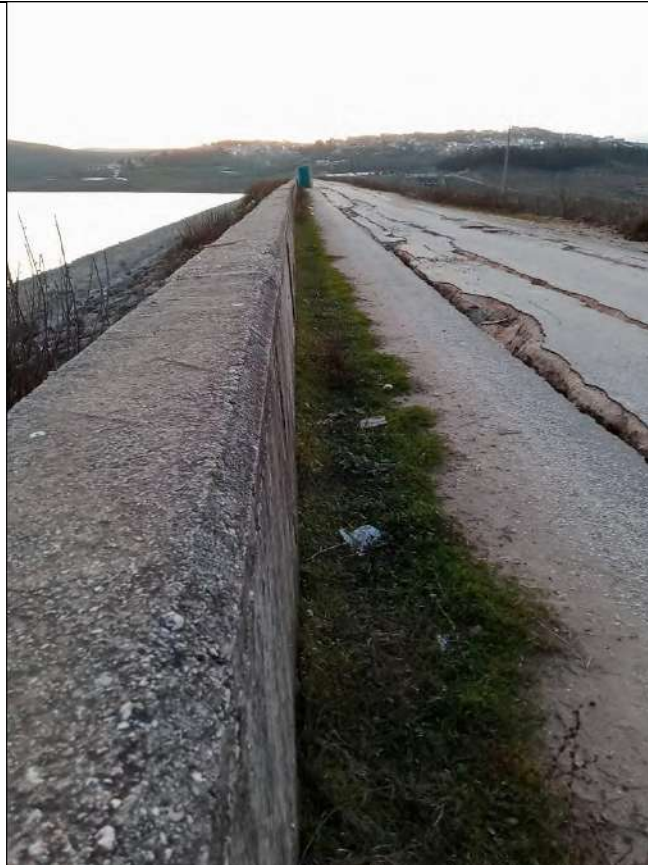


18 Feb 2023 10:21:05

**BIBLIOGRAFIA:**

- Onder Cetin, K., Cuceoglu, F., Ayhan, B.U., et al., "Performance of hydraulic structures during 6 February 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake sequence", Earthquake Spectra, 2024;
- EERI LFE Program, "February 6, 2023 Türkiye Earthquakes: report on Geoscience and Engineering Impacts, GEER Association Report 082, May 6 2023";
- Ozkula, G., et al., "Preliminary Earthquake Reconnaissance Report: Türkiye Earthquake Sequence on February 6, 2023, April 2023".

Nome della diga		Yarseli dam
Paese		Turchia
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga in terra Anno di costruzione 1985-1991 Hmax = 43.5 m Lunghezza coronamento = 960 m Volume d'invaso 54.5 x106 m3
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	6 febbraio 2023, evento principale a 33 km SO di Kahramanmaraş e principale replica a 62 km NO della stessa città (Turchia)
	Distanza epicentro – diga (km)	129km
	Magnitudo (M _L o M _W)	7.8
	Profondità (km)	8.6 – 7.0
	a _{max} registrata alla diga (g)	0.54
	Livello di invaso (m s.l.m.) durante l'evento sismico	121.07 (18.4% della capacità totale)
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Fratture in cresta con apertura laterale tra 15-25 cm dovute probabilmente a compressione sismica. Bolle di sabbia e spostamenti laterali indotti da liquefazione sono stati riscontrati a valle in prossimità della spalla destra. Elementi idraulici non hanno subito danni. Cedimenti tra 8 e 12 cm.
Provvedimenti adottati		Strada lungo il coronamento chiusa al traffico
Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico		
 North East Elevation 248°SW (T) • 36.194258, 36.326858 ±2 m ▲ 145 m 14 Feb 2023 19:22:40 Fessure longitudinali sul coronamento		



Fessure longitudinali sul coronamento



Bolle di sabbia indotte da processi di liquefazione

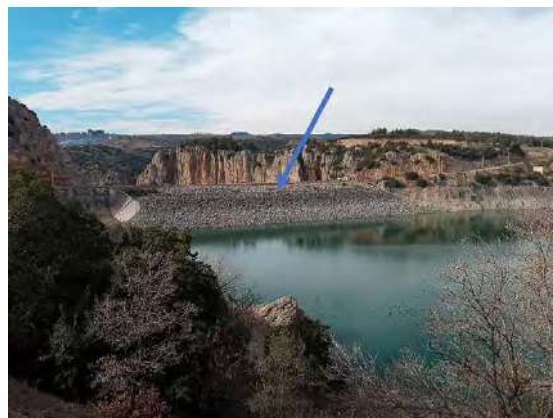
BIBLIOGRAFIA:

- Onder Cetin K, Cuceoglu F, Ayhan BU, et al. Performance of hydraulic structures during 6 February 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake sequence. Earthquake Spectra. 2024;
- EERI LFE Program, February 6, 2023 Türkiye Earthquakes: report on Geoscience and Engineering Impacts, GEER Association Report 082, May 6 2023;
- Ozkula G. et al, Preliminary Earthquake Reconnaissance Report: Türkiye Earthquake Sequence on February 6, 2023, April 2023;
- <https://bianet.org/haber/sharp-current-rise-in-orontes-river-274261>.

Nome della diga		Kartalkaya dam
Paese		Turchia
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga in terra con nucleo di argilla Anno di costruzione 1965-1972 Hmax = 56 m (dal letto del fiume) Volume d'invaso $195 \times 10^6 \text{ m}^3$
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	6 febbraio 2023, evento principale a 33 km SO di Kahramanmaraş e principale replica a 62 km NO della stessa città (Turchia)
	Distanza epicentro – diga (km)	34
	Magnitudo (M_L o M_W)	7.8
	Profondità (km)	8.6 – 7.0
	$a_{\max}$ registrata alla diga (g)	0.66
	Livello di invaso (m s.l.m.) durante l'evento sismico	699.16 (Livello d'invaso basso a causa della siccità in corso)
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Fratture in cresta di spessore variabile tra 15-35 cm. I muri d'ala dell'opera di scarico hanno subito danni superficiali. Non sono state riscontrate fessurazioni sui paramenti. Nessuna traccia di liquefazione data la natura rocciosa dei materiali in posto. Il danneggiamento in cresta appare dovuto alla compressione sismica del rilevato.
Provvedimenti adottati		Limitazione del livello d'invaso al 45%
Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico		
		
Fratture in cresta		



Lesioni ai muri di scarico



Vista a monte del paramento



Vista di valle delle opere di scarico

BIBLIOGRAFIA:

- Onder Cetin K, Cuceoglu F, Ayhan BU, et al. Performance of hydraulic structures during 6 February 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake sequence. Earthquake Spectra. 2024;
- EERI LFE Program, February 6, 2023 Türkiye Earthquakes: report on Geoscience and Engineering Impacts, GEER Association Report 082, May 6 2023.

Nome della diga		Reyhanli dam
Paese		Turchia
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga in terra zonata da 0 a 6 km; diga di sabbia/ghiaia con nucleo impermeabile da 6 a 9 km. Anno di costruzione 2013-2020 Hmax = 28.2 m Lunghezza coronamento = 9271 km Volume d'invaso 480 x10 ⁶ m ³
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	6 febbraio 2023, evento principale a 33 km SO di Kahramanmaraş e principale replica a 62 km NO della stessa città (Turchia)
	Distanza epicentro – diga (km)	102
	Magnitudo (M _L o M _W)	7.8
	Profondità (km)	8.6 – 7.0
	a _{max} registrata alla diga (g)	0.23
	Livello di invaso (m s.l.m.) durante l'evento sismico	Serbatoio vuoto
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Formazione di fratture in cresta, cedimenti e traslazioni permanenti verso monte (fino a 1-1.2 m). Cedimenti in cresta variabili da 5-10 cm a 15-80 cm in funzione del tratto di diga.
Provvedimenti adottati		-

Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico



Planimetria di individuazione dei danni riscontrati



Fessure longitudinali in cresta



Fessure longitudinali in cresta

BIBLIOGRAFIA:

- Onder Cetin K, Cuceoglu F, Ayhan BU, et al. Performance of hydraulic structures during 6 February 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake sequence. Earthquake Spectra. 2024;
- EERI LFE Program, February 6, 2023 Türkiye Earthquakes: report on Geoscience and Engineering Impacts, GEER Association Report 082, May 6 2023.

Nome della diga		Cat dam
Paese		Turchia
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga in pietrame con nucleo in terra Anno di costruzione 1985-1996 Hmax = 78 m Lunghezza coronamento = 267 m Volume d'invaso $240.0 \times 10^6 \text{ m}^3$
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	6 febbraio 2023, Celikhan (Turchia)
	Distanza epicentro – diga (km)	19
	Magnitudo (M_L o M_W)	6
	Profondità (km)	10
	$a_{\max}$ registrata alla diga (g)	0.16 (stimata da USGS)
	Livello di invaso (m s.l.m.) durante l'evento sismico	575m s.l.m. (massimo livello di regolazione), successivamente ridotto rapidamente a 555m s.l.m..
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Cedimento differenziale tra il rilevato della diga e la struttura in cls dello sfioratore fino a 40 cm. Fratture del corpo diga con apertura in cresta fino a 25-30 cm.
Provvedimenti adottati		-

Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico



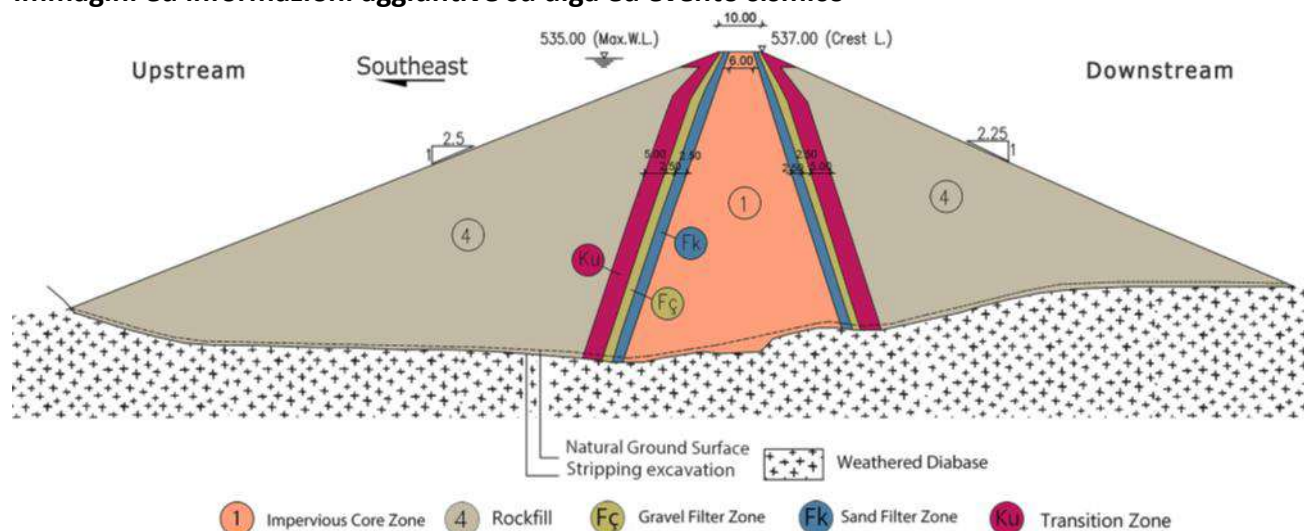
Immagini varie dell'opera e dei danni riscontrati

BIBLIOGRAFIA:

- Onder Cetin K, Cuceoglu F, Ayhan BU, et al. Performance of hydraulic structures during 6 February 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake sequence. Earthquake Spectra. 2024;
- Hariri-Ardebili M.A., Tosun H., Dams in the wake-up call of the 2023 Türkiye earthquake sequence: Insights from observed damages, risk assessment, and monitoring, International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024;
- USGS Search Earthquake Catalog
<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000jm1y/executive>.

Nome della diga		Kalecik dam
Paese		Turchia
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga in pietrame con rivestimento in cls Anno di costruzione 1978-1985 Hmax = 80 m Lunghezza coronamento = 194 m Volume d'invaso 32.75 x10 ⁶ m ³
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	6 febbraio 2023, evento principale a 33 km SO di Kahramanmaraş e principale replica a 11 km dall'evento principale (Turchia)
	Distanza epicentro – diga (km)	50
	Magnitudo (M _L o M _W)	7.8
	Profondità (km)	8.6
	a _{max} registrata alla diga (g)	0.33
	Livello di invaso (m s.l.m.) durante l'evento sismico	514.35
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Fratture longitudinali parallele alla cresta, spostamenti laterali permanenti fino a 115 cm al centro e a 50 cm in prossimità delle spalle e cedimenti variabili tra 40 cm al centro e 30 cm alle spalle
Provvedimenti adottati		-

Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico



Sezione tipologica trasversale dello sbarramento



Principali danni riscontrati

BIBLIOGRAFIA:

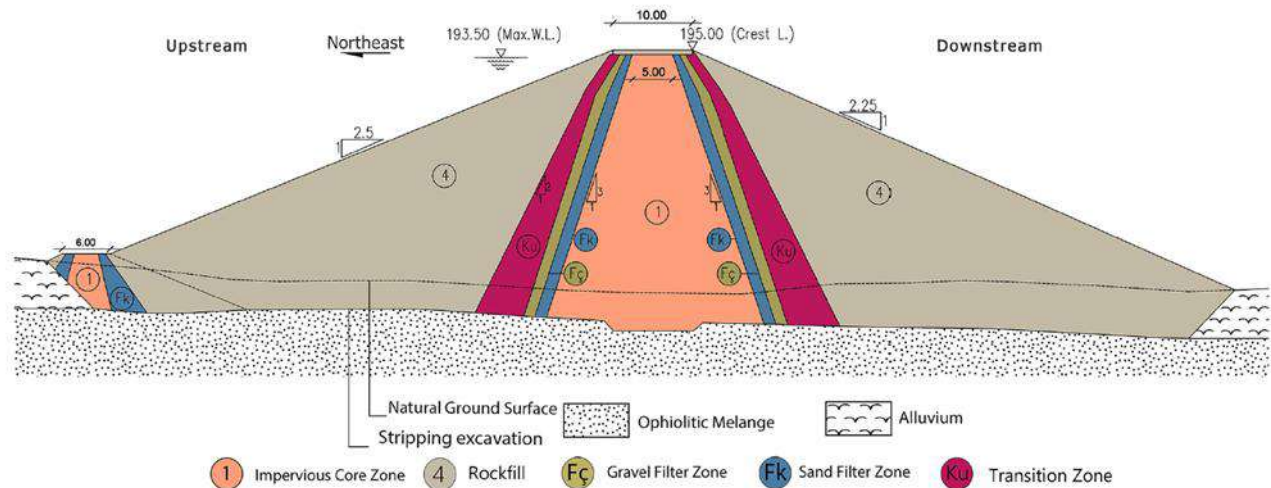
- Onder Cetin K, Cuceoglu F, Ayhan BU, et al. Performance of hydraulic structures during 6 February 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake sequence. Earthquake Spectra. 2024;
- Hariri-Ardebili M.A., Tosun H., Dams in the wake-up call of the 2023 Türkiye earthquake sequence: Insights from observed damages, risk assessment, and monitoring, International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024.

Nome della diga		Aslantas dam
Paese		Turchia
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga in terra zonata Anno di costruzione 1984 Hmax = 95 m Lunghezza coronamento = 566 m Volume d'invaso 1928x10 ⁶ m ³
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	6 febbraio 2023, evento principale a 33 km SO di Kahramanmaraş e principale replica a 11 km dall'evento principale (Turchia)
	Distanza epicentro – diga (km)	66
	Magnitudo (M _L o M _W)	7.8
	Profondità (km)	8.6
	a _{max} registrata alla diga (g)	0.18 (stimata, registrati nella stazione più vicina, a 19.4 km di distanza)
	Livello di invaso (m s.l.m.) durante l'evento sismico	140.04
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Fratture minori in cresta con aperture fino a 10 cm e profondità di 40-45 cm
Provvedimenti adottati		-
Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico		
Deformation in US slope  Deviation of vertical elements  Deep cracks at the crest  		
Principali danni riscontrati		
BIBLIOGRAFIA: - Onder Cetin K, Cuceoglu F, Ayhan BU, et al. Performance of hydraulic structures during 6 February 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake sequence. Earthquake Spectra. 2024;		

- Hariri-Ardebili M.A., Tosun H., Dams in the wake-up call of the 2023 Türkiye earthquake sequence: Insights from observed damages, risk assessment, and monitoring, International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024.

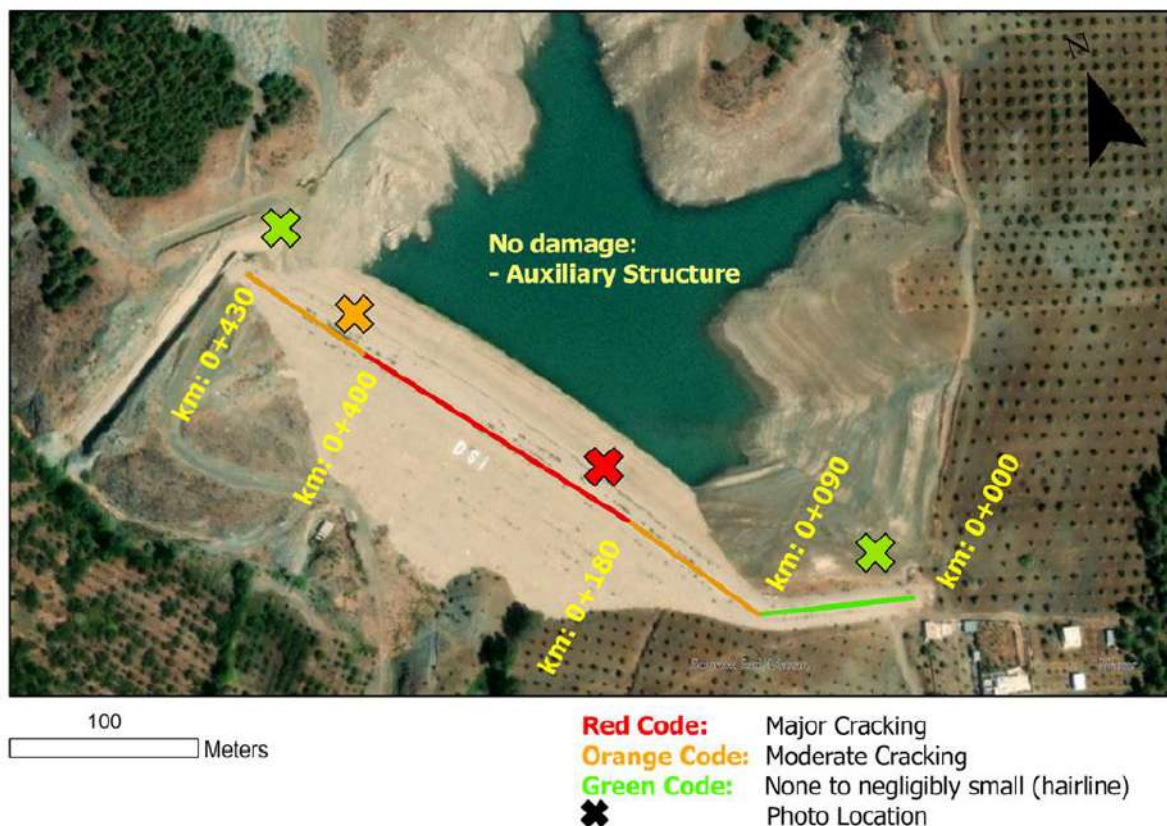
Nome della diga		Hassa - Demrek dam
Paese		Turchia
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga in terra Anno di costruzione 1997 - 2006 Hmax = 29.6 m Lunghezza coronamento = 503 m Volume d'invaso $1.66 \times 10^6 \text{ m}^3$
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	6 febbraio 2023, evento principale a 33 km SO di Kahramanmaraş e principale replica a 11 km dall'evento principale (Turchia)
	Distanza epicentro – diga (km)	80
	Magnitudo (M_L o M_W)	7.8
	Profondità (km)	8.6
	$a_{\max}$ registrata alla diga (g)	0.71
	Livello di invaso (m s.l.m.) durante l'evento sismico	140.04
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Fratture minori in cresta con aperture fino a 6-8 cm e profondità di 40-60 cm. Fratture rilevate anche al piede del paramento di valle.
Provvedimenti adottati		-
Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico		
BIBLIOGRAFIA: - Onder Cetin K, Cuceoglu F, Ayhan BU, et al. Performance of hydraulic structures during 6 February 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquake sequence. Earthquake Spectra. 2024; - Hariri-Ardebili M.A., Tosun H., Dams in the wake-up call of the 2023 Türkiye earthquake sequence: Insights from observed damages, risk assessment, and monitoring, International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024.		

Nome della diga		Kırıkhan- Kurtlusoguksu dam
Paese		Turchia
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga in terra (ECD) Anno di costruzione 2017 Hmax = 40 m Lunghezza coronamento = 419 m Volume d'invaso $0.75 \times 10^6 \text{ m}^3$ Utilizzo: Irriguo
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	6 febbraio 2023, evento principale a 33 km SO di Kahramanmaraş e principale replica a 11 km dall'evento principale (Turchia)
	Distanza epicentro – diga (km)	103
	Magnitudo (M_L o M_W)	7.8
	Profondità (km)	8.6 – 7.0
	$a_{\max}$ registrata alla diga (g)	0.75
	Livello di invaso (m s.l.m.) durante l'evento sismico	173.8 – 193.5
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Fratture in cresta con profondità fino a 1.8 m e larghezza variabile tra 10 e 120 cm. Cedimento rilevato 0.60 m Danni indentificati come "Moderati".
Provvedimenti adottati		-
Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico La diga si trova all'interno dei confini della provincia di Hatay e sbarra un affluente del fiume Rebel. La fondazione è composta da un complesso ofiolitico, caratterizzato da un insieme eterogeneo di rocce, tra cui formazioni ultramafiche, mafiche e associate. Si tratta di una diga in rockfill con nucleo in materiale sciolto impermeabile. Nella figura di seguito è riportata una vista satellitare mentre in quella successiva è riportata la sezione di massima altezza con le caratteristiche geologiche.		
		
Vista satellitare		

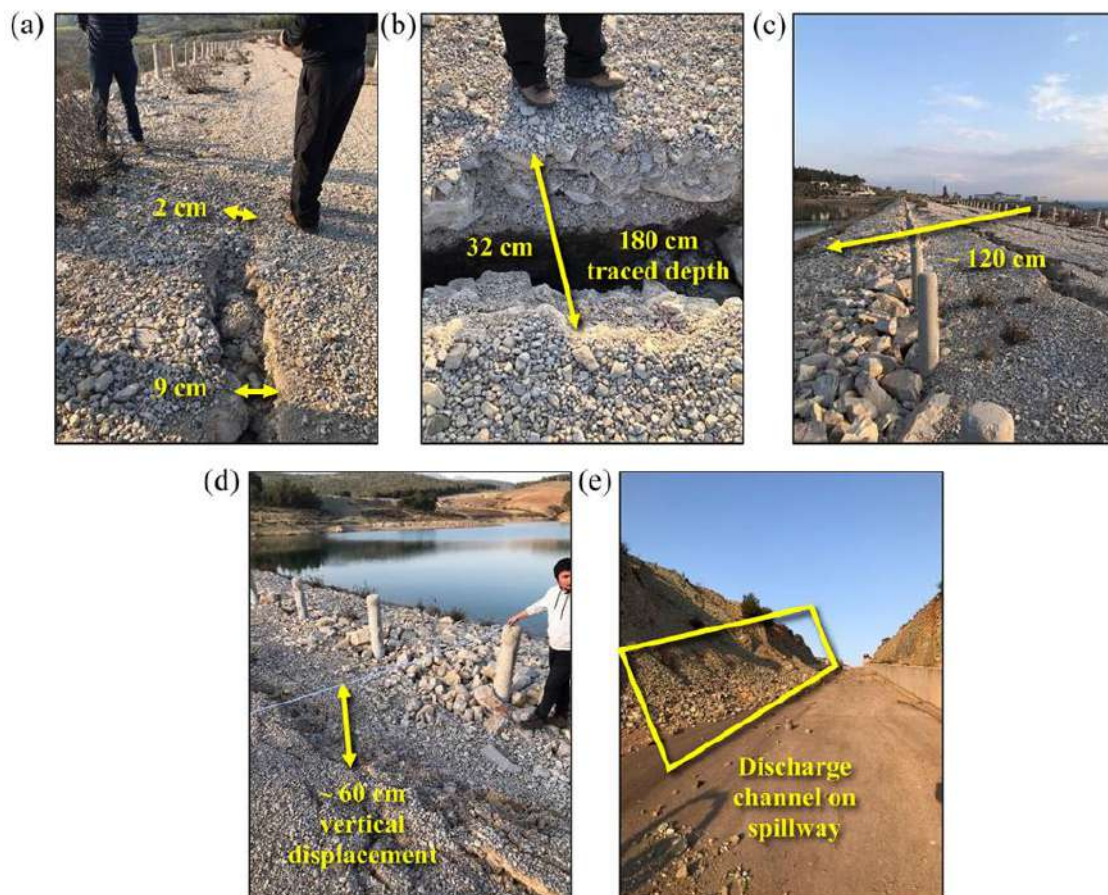


Sezione di massima altezza

Nella figura successiva viene riportata una mappa dettagliata delle fessure identificate dalle immagini satellitari. La gravità delle deformazioni permanenti è stata codificata a colori nella stessa figura. Nella zona verde, il danno è assente o si presenta sotto forma di microfratture. Nella zona con fessurazione moderata, le aperture variavano tra 8 e 31 cm. Il colore rosso indica il danno più elevato osservato in cresta, dove la larghezza della fessura si estende fino a un massimo di 120 cm con una profondità tracciata di 180 cm, accompagnata da un cedimento relativo di 60 cm. Non sono stati osservati danni alle strutture accessorie, ma sono state registrate cadute di massi e colate detritiche nel canale di scarico.



Spatial distribution of deformations mapped on the dam body in Kurtlusog̃ uksu dam



Immagini scattate durante l'ispezione del sito nella diga di Kurtlusoguksu: (a) fessure da 2 a 9 cm, (b) fessure da 32 cm con profondità tracciata di 180 cm, (c) spostamento laterale di 120 cm per una singola sezione trasversale in totale e (d) frana detritica visibile sul canale di scarico



Fessure longitudinale rilevate a seguito del sisma del 06/02/2023

BIBLIOGRAFIA:

- Cetin K.O., Cuceoglu F., Ayhan B.U., Yildirim S., Aydin S., Demirdogen S., Er S., Gurbu A., Moss R.B.S.. Performance of hydraulic structures during 6 February 2023 Kahramanmaraş, Türkiye earthquake sequence. Earthquake Spectra. 2024;
- Hariri-Ardebili M.A., Tosun H., Dams in the wake-up call of the 2023 Türkiye earthquake sequence: Insights from observed damages, risk assessment, and monitoring, International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024;
- Lasghari A., Moss R.B.S.. Displacement and damage analysis of earth dams during the 2023 Türkiye earthquake sequence. Earthquake Spectra. 2024.

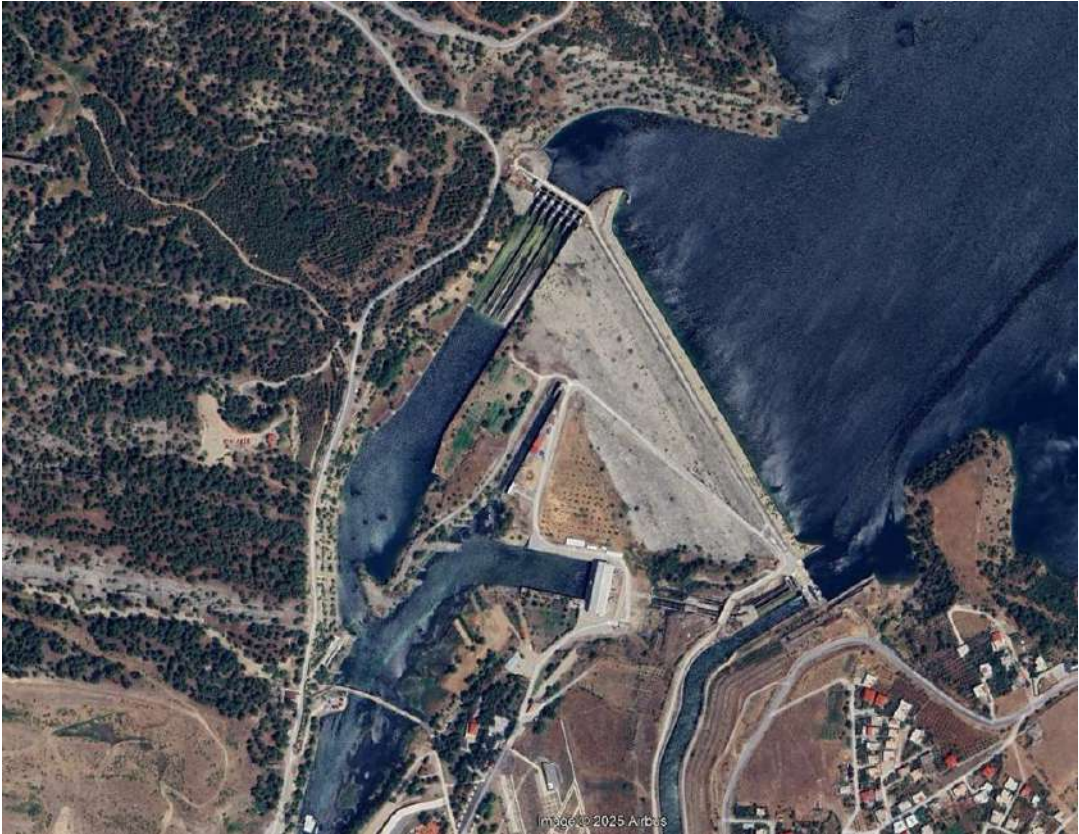
Nome della diga		Nurdagi-Hamidiye dam
Paese		Turchia
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga in terra (ECD) Anno di costruzione 2017 Hmax = 29 m Lunghezza coronamento = 182 m Volume d'invaso $1.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ Utilizzo: Irriguo
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	6 febbraio 2023, evento principale a 33 km SO di Kahramanmaraş e principale replica a 11 km dall'evento principale (Turchia)
	Distanza epicentro – diga (km)	18
	Magnitudo (M_L o M_W)	7.8
	Profondità (km)	8.6 – 7.0
	$a_{\max}$ registrata alla diga (g)	0.61
	Livello di invaso (m s.l.m.) durante l'evento sismico	-
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Fratture in cresta con profondità di 15-20 cm. Cedimento rilevato 0.45 m Danni indentificati come "Severi".
Provvedimenti adottati		-
Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico		
		
Vista satellitare		



Fessure longitudinale rilevate a seguito del sisma del 06/02/2023

BIBLIOGRAFIA:

- Cetin K.O., Cuceoglu F., Ayhan B.U., Yildirim S., Aydin S., Demirdogen S., Er S., Gurbu A., Moss R.B.S.. Performance of hydraulic structures during 6 February 2023 Kahramanmaraş, Türkiye earthquake sequence. Earthquake Spectra. 2024;
- Hariri-Ardebili M.A., Tosun H., Dams in the wake-up call of the 2023 Türkiye earthquake sequence: Insights from observed damages, risk assessment, and monitoring, International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024;
- Lasghari A., Moss R.B.S.. Displacement and damage analysis of earth dams during the 2023 Türkiye earthquake sequence. Earthquake Spectra. 2024.

Nome della diga		Kılavuzlu- Baraji dam
Paese		Turchia
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Diga in terra zonata (ZED) Anno di costruzione 2014 Hmax = 61 m Lunghezza coronamento = 556 m Volume d'invaso $74 \times 10^6 \text{ m}^3$ Utilizzo: Idroelettrico
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	6 febbraio 2023, evento principale a 33 km SO di Kahramanmaraş e principale replica a 11 km dall'evento principale (Turchia)
	Distanza epicentro – diga (km)	40
	Magnitudo (M_L o M_W)	7.8
	Profondità (km)	8.6 – 7.0
	$a_{\max}$ registrata alla diga (g)	0.15
	Livello di invaso (m s.l.m.) durante l'evento sismico	443.48 – 485.5
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Fratture in cresta con larghezza fino a 50 cm e profondità fino a 60 cm. Cedimenti massimi di 25 cm. Danni indentificati come “Moderati”.
Provvedimenti adottati		-
Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico		
		
Vista satellitare		

BIBLIOGRAFIA:

- Cetin K.O., Cuceoglu F., Ayhan B.U., Yildirim S., Aydin S., Demirdogen S., Er S., Gurbu A., Moss R.B.S.. Performance of hydraulic structures during 6 February 2023 Kahramanmaraş, Türkiye earthquake sequence. Earthquake Spectra. 2024;
- Hariri-Ardebili M.A., Tosun H., Dams in the wake-up call of the 2023 Türkiye earthquake sequence: Insights from observed damages, risk assessment, and monitoring, International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024;
- Lasghari A., Moss R.B.S.. Displacement and damage analysis of earth dams during the 2023 Türkiye earthquake sequence. Earthquake Spectra. 2024.

Nome della diga		Zadeja Dam
Paese		Albania
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Rockfill dam con nucleo in argilla, 1971 fine costruzione Altezza diga: 60m Lunghezza coronamento: 387m
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	26 Novembre 2019 - Drini River cascade
	distanza epicentro – diga (km)	65.2
	Magnitudo (M_L o M_W)	6.2
	Profondità (km)	--
	a_{max} registrata alla diga (g)	0.04
	Livello di invaso (m s.l.m.)	--
Danni riscontrati (o assenza di danni)		La diga ha reagito abbastanza bene alle scosse sismiche; dopo i controlli visivi effettuati dopo ogni terremoto, sono stati effettuati il monitoraggio del livello delle acque sotterranee, il monitoraggio della quantità di filtrazione nel corpo della diga, misure di monitoraggio geodetico, ecc.; secondo questi controlli risulta che la risposta agli shock sismici del 2019 è rimasta in fase elastica con deformazioni reversibili con valore massimo di 2,8 mm.
Provvedimenti adottati		-

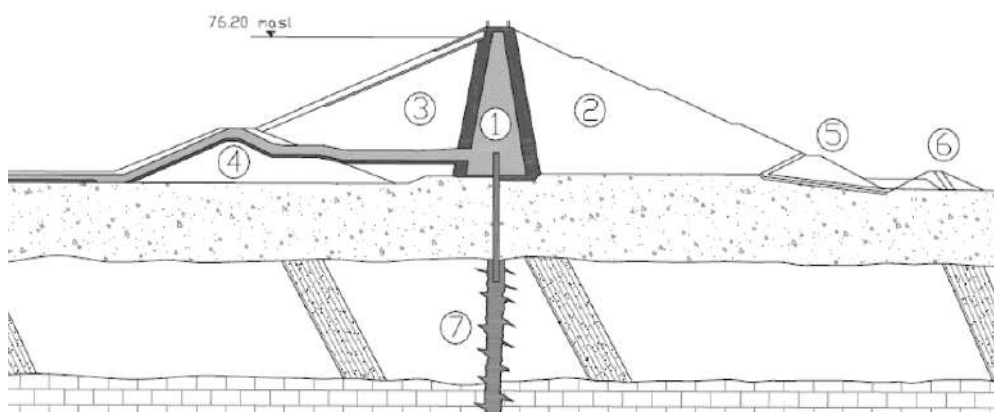
Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico



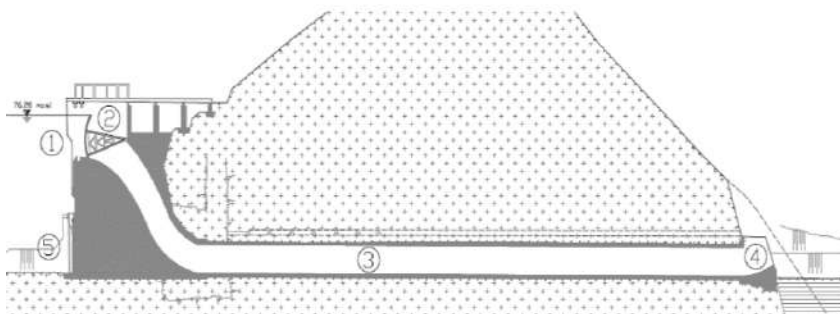
Vista della diga



Planimetria di dettaglio della diga, 1971



- 1- Berthama e diges / Clay Core
- 2- Zona I e sipërme e mbushjes/upstream pervious zone I
- 3-Zona I e poshtme e mbushjes / downstream pervious zone I
- 4- Diga e perkohshme e sipërme / upstream cofferdam
- 5- Zona II e poshtme e mbushjes / downstream pervious zone II
- 6- Diga e perkohshme e poshtme / downstream cofferdam
- 7- Perde cimentimi / Grout Curtain



- 1- Ujembledhesi / Reservoir
- 2- Portat e Shkarkuesit / Spillway Gates
- 3- Tuneli I shkarkuesit / Spillway Tunnel
- 4- Trampilini I daljes / Flip Bucket of Spillway

Diga e Zadejes / Zadeja Dam

2021

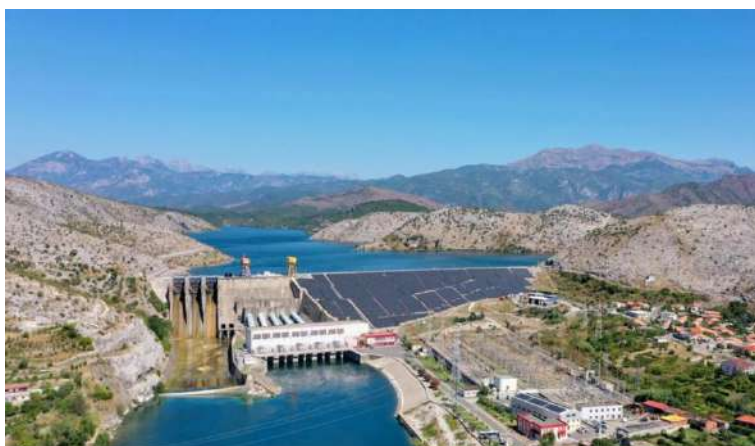
Te dhenat per Sistemet e Monitorimit diges			Data on Dam Monitoring Systems
Perdoruesi i diges	KESH sh.a	APC	Dam User/Owner
1- Sistem i Monitorimit Gjeodezik	Po	Yes	Geodetic Monitoring System
1.1- Monumente Betoni	15 cope	15	Concrete Monuments
1.2- Pika Referimi Gjeodezike	9 cope	9	Geodetic reference Points
1.3- Pika Nivelimi Gjeodezike	8 cope	8	Geodetic Leveling Points
1.4- Pilar	6 cope	6	Pillar
1.5- Pika te forta Gjeodezike	9 cope	9	Geodetic Fix Points
2- Sistemi i Monitorimit Hidrogjeologjik	Po	Yes	Hydrogeologic Monitoring System
2.1 - Piezometra ne dige	9 cope	9	Piezometers on dam
2.2 - Piezometra ne shpatet e diges	4 cope	4	Piezometers on dam sides
3- Sistemi i Monitorimit Hidrometeorologjik	Po	Yes	Hydrometeorologic Monitoring System
3.1 - Stacione Hidrologjik	1	1	Hydrological Station
3.2- Stacione Meteorologjike	0	0	Meteorological Stations
4- Sistemi i Monitorimit Sizmik	Po	Yes	Seismic Monitoring System
4.1 - Sizmografe (akselerometer)	2	2	Seismograph (accelerometer)
5- Sistemi i Monitorimit Hidraulik	Po	Po	Hydraulic Monitoring System
5.1 - Kaperderdhes	1	1	Flow measurement equipment

BIBLIOGRAFIA :

ALBCOLD

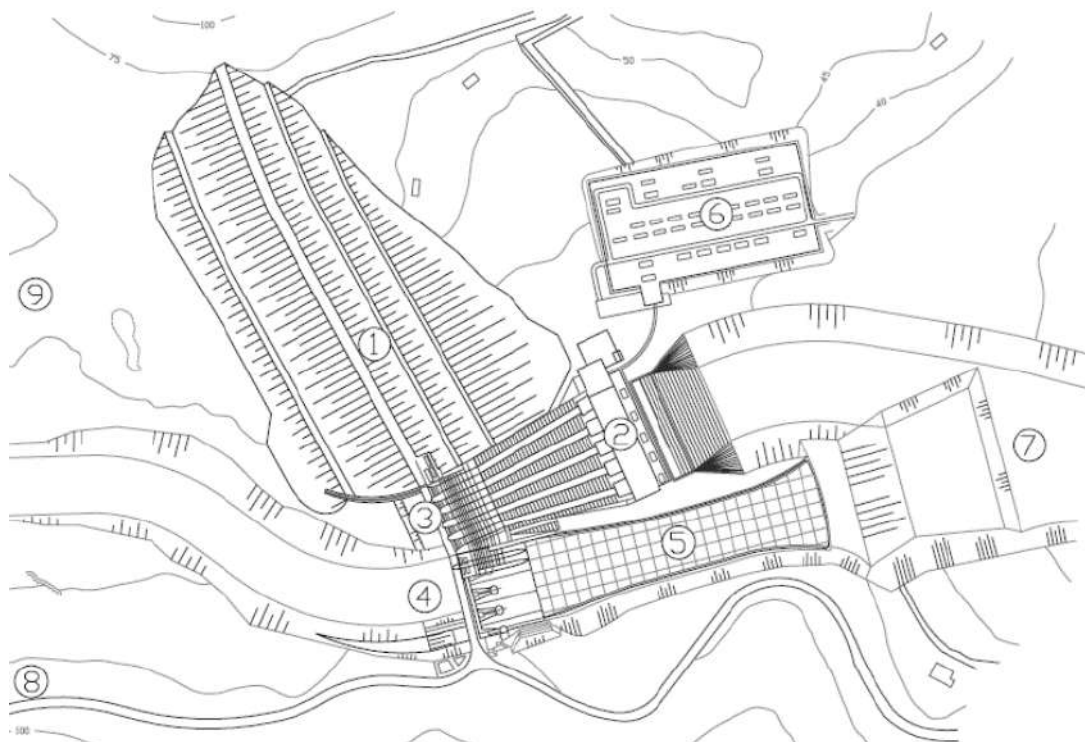
Nome della diga		Qyrsaqi Dam
Paese		Albania
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		Rockfill dam with clay core+Concrete 54.0 m Dam Height 514.0 mDam Crest length 1971 Completion Data
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	26 Novembre 2019 - Drini River cascade
	distanza epicentro – diga (km)	65
	magnitudo (M_L o M_W)	6.2
	profondità (km)	
	a_{max} registrata alla diga (g)	0.07
	Livello di invaso (m s.l.m.)	
Danni riscontrati (o assenza di danni)		La diga ha reagito abbastanza bene alle scosse sismiche; dopo i controlli visivi effettuati dopo ogni terremoto, il monitoraggio del livello delle acque sotterranee, monitorandone la quantità di filtrazione nel corpo della diga, misure di monitoraggio geodetico, ecc. secondo questi controlli risulta che la risposta agli shock sismici del 2019 era in fase elastica con deformazioni reversibili con valore massimo di 2,8 mm
Provvedimenti adottati		-

Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico





Planimetria



1- Trupi I Diges / Dam Body

3 - Vepra e Marrjes / Intake

5 - Pershpejtuesi / Chute

7 - Zona e shuarjes se energjise / Scour Area

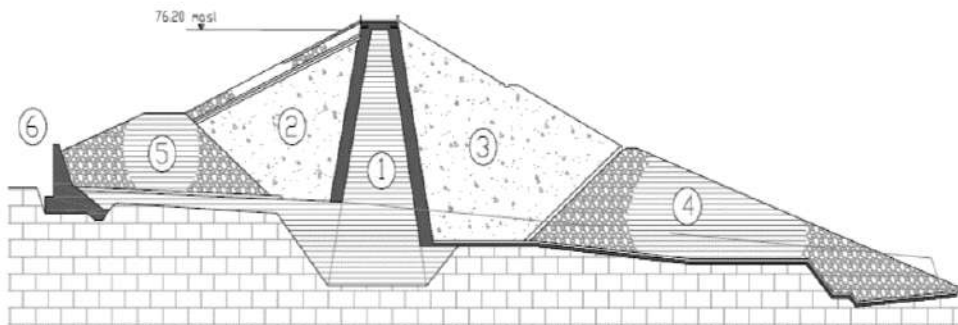
2- Ndertesa e Centralit / Power House

4- Shkarkuesit / Spillways

6- Nenstacioni elektrik / Switchway

8- Rruga per ne digen e Zadejes/Road to

Zadeja Dam



Cross Section of Rockfill Dam

1- Berthama e diges / Clay Core

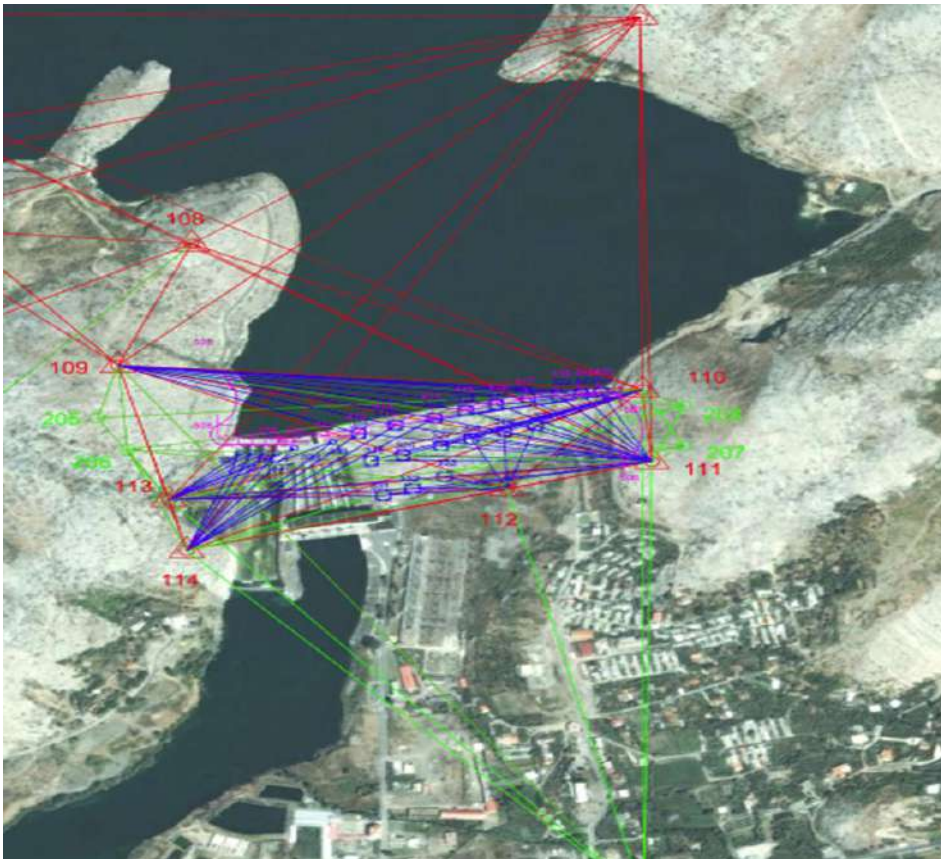
2- Zona I e sipërme e mbushjes/upstream previous zone I

3-Zona I e poshtme e mbushjes / downstream previous zone I

4- Zona II e poshtme e mbushjes / Downstream previous zone II

5- Zona II e sipërme e mbushjes / Upstream previous zone II

6- Muri mbajtes / Heel Wall



Layout of Dam Monitoring Systems

HARTA E RRJETIT PIEZOMETRIK, SENSORVE TË SIZMIKËS NË DIGËN QYRSAQ



Diga e Qyrsaqit / Qyrsaqi Dam

2021

Te dhenat per Sistemet e Monitorimit diges

Data on Dam Monitoring Systems

Perdoruesi i diges	KESH sh.a	APC	Dam User/Owner
1- Sistem i Monitorimit Gjeodezik	Po	Yes	Geodetic Monitoring System
1.1- Monumente Betoni	18 cope	18 pieces	Concrete Monuments
1.2- Pika Referimi Gjeodezike	8 cope	8 pieces	Geodetic reference Points
1.3- Pika Nivelimi Gjeodezike	16 cope	16 pieces	Geodetic Leveling Points
1.4- Pilar	4 cope	4 pieces	Pillar
1.5- Pika te forta Gjeodezike	8 cope	8 pieces	Geodetic Fix Points
2- Sistemi i Monitorimit Hidrogjeologjik	Po	Yes	Hydrogeologic Monitoring System
2.1 - Piezometra ne dige	9 cope	9 pieces	Piezometers on dam
2.2 - Piezometra ne shpatet e diges	2 cope	2 pieces	Piezometers on dam sides
3- Sistemi i Monitorimit Hidrometeorologjik	Po	Yes	Hydrometeorologic Monitoring System
3.1 - Stacione Hidrologjik	2	2	Hydrological Station
3.2- Stacione Meteorologjike	1	1	Meteorological Stations
4- Sistemi i Monitorimit Sizmik	Po	Yes	Seismic Monitoring System
4.1 - Sizmografe (akeleratore)	4	4	Sismographs (accelerators)
5- Sistemi i Monitorimit Hidraulik	Po	Yes	Hydraulic Monitoring System
5.1 - Kaperderdhes	5	5	Flow measurement equipment
6- Sistemi i Alarmit	Po	Yes	Alarm System
6.1 - Sirene Alarmi	1	1	Alarm siren

BIBLIOGRAFIA:

ALBCOLD

Nome della diga		Koman Dam
Paese		Albania
Tipologia di diga e caratteristiche costruttive		concrete faced rockfill dam H 115m L 275m Completata 1986
Caratteristiche dell'evento sismico	Data e luogo	26 Novembre 2019 - Drini River cascade
	distanza epicentro – diga (km)	79.7
	magnitudo (M_L o M_W)	6.2
	profondità (km)	
	a_{max} registrata alla diga (g)	0.03
	Livello di invaso (m s.l.m.)	
Danni riscontrati (o assenza di danni)		Sulla base dei dati ottenuti dalle misurazioni effettuate, si può dire che la diga ha reagito abbastanza bene alle scosse sismiche. I valori di questi eventi sismici sono inferiori al limite di stabilità per cui la diga è stata progettata. Questa conclusione arriva anche dopo i controlli effettuati dopo ogni terremoto. Secondo questi controlli risulta che la risposta agli shock sismici del 2019 era in fase elastica con deformazioni reversibili con valore massimo di 2,8 mm.
Provvedimenti adottati		-

Immagini ed informazioni aggiuntive su diga ed evento sismico



Vista da valle della diga di Koman



Vista da monte della diga di Koman

BIBLIOGRAFIA:
ALBCOLD