POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile Idraulica

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi a scala mondiale degli incidenti su piccole e grandi dighe

Relatori

Prof. Davide Poggi
Prof.ssa Silvia Cordero

Candidato

Luca Distasi

Aprile 2019

Anno Accademico 2018/2019

Sommario

1 INTRODUZIONE 9
1.1 Progettare rispetto agli insuccessi 9
1.2 Obiettivi attesi 10
2 I DATABASE CONSULTATI 11
2.1 Database ARIA 11
2.1.1 Informazioni generali 11
2.1.2 Metodo di ricerca 12
2.1.3 Punti di forza 13
2.1.4 Punti di debolezza 13
2.2 Database NPDP 14
2.2.1 Informazioni generali 14
2.2.2 Metodo di ricerca 14
2.2.3 Punti di forza 17
2.2.4 Punti di debolezza 18
2.3 Database ICOLD 19
2.3.1 Informazioni generali 19
2.3.2 Metodo di ricerca 19
2.3.3 Punti di forza 21
2.3.4 Punti di debolezza 21
2.4 Database NID 22
2.4.1 Informazioni generali 22
2.4.2 Metodo di ricerca 22
2.4.3 Punti di forza 23
2.4.4 Punti di debolezza 23
2.5 Database testuali 24
2.5.1 “History of Dam Failures” 24
2.5.2 “Overtopping of four smalls dams in Czech Republic” 24
2.5.3 “Case Histories of Earthen Dam Failures” 25
2.5.4 “Three Cases of Italian Dam Failures” 25
2.5.5 “Concrete Dams Case Studies” 26
2.5.6 “ARUP Database” 26
2.5.7 “Case Histories of Earthen Dam Failures” 26
3 STUDIO DATABASE DIGHE 27

3.1 Grandi dighe 27
3.1.1 Introduzione generale 27
3.1.2 Distribuzione per Continente 29
3.1.3 Distribuzione per Stato 30
3.1.4 Distribuzione per Tipologia 32
3.1.5 Distribuzione per Funzione 34
3.1.6 Distribuzione per Altezza 35
3.1.7 Distribuzione per Volume di Invaso 37
3.1.8 Distribuzione per Anno di Costruzione 39
3.1.9 Correlazione Continente-Tipologia 42
3.1.10 Correlazione Continente-Funzione 44
3.1.11 Correlazione Continente-Altezza 45
3.1.12 Correlazione Continente-Volume di Invaso 46
3.1.13 Correlazione Continente-Anno di Costruzione 47
3.1.14 Correlazione Stato-Tipologia 48
3.1.15 Correlazione Stato-Funzione 49
3.1.16 Correlazione Stato-Altezza 51
3.1.17 Correlazione Stato-Volume di Invaso 53
3.1.18 Correlazione Stato-Anno di Costruzione 54
3.1.19 Correlazione Tipologia-Funzione 57
3.1.20 Correlazione Tipologia-Altezza 58
3.1.21 Correlazione Tipologia-Volume di Invaso 59
3.1.22 Correlazione Tipologia-Anno di Costruzione 61
3.1.23 Correlazione Funzione-Altezza 62
3.1.24 Correlazione Funzione-Volume di Invaso 63
3.1.25 Correlazione Funzione-Anno di Costruzione 64
3.1.26 Correlazione Altezza-Volume di Invaso 65
3.1.27 Correlazione Altezza-Anno di Costruzione 67
3.1.28 Correlazione Volume di Invaso-Anno di Costruzione 69
3.2 Piccole dighe 71
3.2.1 Introduzione generale 71
3.2.2 Distribuzione per Stato 72
3.2.3 Distribuzione per Tipologia 74
3.2.4 Distribuzione per Classe di Rischio 76
3.2.5 Distribuzione per Funzione 77

3.2.6 Distribuzione per Altezza 80
3.2.7 Distribuzione per Volume di Invaso 81
3.2.8 Correlazione Stato-Tipologia 84
3.2.9 Correlazione Stato–Classe di rischio 86
3.2.10 Correlazioni Stato–Funzione 87
3.2.11 Correlazione Stato–Altezza 89
3.3 Assemblaggio database unificato tra Grandi Dighe e Piccole Dighe 92
3.3.1 Problemi di fondo 92
3.3.2 Uniformità dei parametri 94
3.3.3 Omogeneizzazione Tipologia Primaria 100
3.3.4 Omogeneizzazione Funzione 102
3.3.5 Omogeneizzazione varie 103
3.3.6 La ricalibrazione di NPDP 103
4 ANALISI DEGLI INCIDENTI 107
4.1 Analisi statistica 107
4.1.1 Distribuzione per Continente 107
4.1.2 Distribuzione per Stato 115
4.1.3 Distribuzione per Tipologia Primaria 125
4.1.4 Distribuzione per Anno di Costruzione 136
4.1.5 Distribuzione per Altezza 141
4.1.6 Distribuzione per Anno Incidente 144
4.1.7 Distribuzione per Database di Origine 149
4.1.8 Distribuzione per Causa 153
4.1.9 Distribuzione per Causa Specifica 157
4.1.10 Distribuzione per Crollo/No Crollo 163
4.1.11 Distribuzione per Età 166
4.1.12 Distribuzione per Volume di Invaso 169
5 METODI DI ANALISI STATISTICA DEGLI INCIDENTI 176
5.1 Introduzione generale 176
5.1.1 Presentazione 176
5.2 Approccio Deterministico 177
5.2.1 Descrizione 177
5.2.2 Caso studio: la diga Shrafud allo Stato Limite 179
5.2.3 Potenzialità e limiti del metodo del Fattore di Sicurezza 183
5.3 Metodi di calcolo del Rischio 183

6 FAILURE MODES 187
6.1 Overtopping 187
6.1.1 Considerazioni generali 187
6.1.2 Il processo erosivo 188
6.1.3 I meccanismi di Overtopping 189
6.1.4 I parametri da monitorare 192
6.1.5 Caso studio: South Fork Dam 192
6.1.6 Caso studio: Sella Zerbino Dam 193
6.1.7 Caso studio: Taum Sauk Dam 194
6.2 Earthquake 197
6.2.1 Introduzione 197
6.2.2 I parametri da monitorare 197
6.2.3 I rischi connessi alla sismicità 199
6.2.4 La risposta strutturale delle dighe ai terremoti 201
6.2.5 La previsione dei terremoti 202
6.2.6 Le possibilità di terremoti indotti dalle dighe stesse 203
6.2.7 Banca dati ICOLD 204
6.2.8 Caso studio: Koyna Dam 204
6.3 Internal Erosion 207
6.3.1 Introduzione generale al fenomeno 207
6.3.2 Piping 207
6.3.3 Scour 208
7 EVENT TREE ANALYSIS 209
7.1 Insufficient Spillway Capacity (Overtopping) 209
7.1.1 Occurrence/No occurrence 209
7.1.2 Alarm/No Alarm 210
7.1.3 Containment/No Containment 211
7.1.4 Erosion/Breach 212
7.1.5 Failure/No Failure 213
7.2 Extreme Flood Exceeding Design Capacity (Overtopping) 216
7.2.1 Occurrence/No Occurrence 216
7.2.2 Alarm/ No Alarm 217
7.2.3 Containment/No Containment 218
7.2.4 Erosion/Breach 218
7.2.5 Failure/No Failure 219

7.3 Piping in Dam Body (Quality Issues) 220
7.3.1 Occurrence/No Occurrence 220
7.3.2 Slight Leak/Large Leak 221
7.3.3 Not Developed/Developed 222
7.3.4 Manual Intervention Successful/No Manual Intervention 222
7.3.5 Failure/No Failure 224
7.4 Piping in Foundation (Quality Issues) 225
7.4.1 Occurrence/No Occurrence 225
7.4.2 Slight Leak/Large Leak 226
7.4.3 Not Developed/Developed 226
7.4.4 Manual Intervention Successful/No Manual Intervention 227
7.4.5 Failure/No Failure 227
7.5 Sliding in Dam Body (Quality Issues) 228
7.5.1 Occurrence/No Occurrence 228
7.5.2 Slight Sliding/Large Sliding 229
7.5.3 Developed/Not developed 229
7.5.4 Manual Intervention Successful/No Manual Intervention 230
7.5.5 Failure/No Failure 232
7.6 Esempio del calcolo della probabilità di occorrenza tramite ETA 233
7.6.1 Le ragioni della scelta dell'Extreme Flood per dighe in terra 233
7.6.2 L'ETA di riferimento e la presentazione dei dati 234
7.6.3 Occurrence/No Occurrence 235
7.6.4 Alarm/No Alarm 235
7.6.5 Containment/No Containment 236
7.6.6 Erosion/Breach 236
7.6.7 Failure/No Failure 237
7.6.8 Risultato finale 238
8 CONCLUSIONI FINALI 239
8.1 Analisi statistica dighe 239
8.2 Analisi statistica incidenti 240
9 FONTI 241
9.1 Bibliografia 241
9.2 Sitografia 245

1 INTRODUZIONE

1.1 Progettare rispetto agli insuccessi

In ambito ingegneristico, e in misura perfino più pronunciata nell'Ingegneria Idraulica, la progettazione di opere strutturali tende a basarsi in maniera quasi spontanea sugli effettivi progressi della tecnica, con particolare riguardo nei confronti dei precedenti particolarmente distintisi per la loro stabilità e affidabilità[1]. Questo modo di ragionare consente senza dubbio di esaltare le conquiste del progresso umano, andando ad implementare di volta in volta le soluzioni più all'avanguardia, che hanno dimostrato di costituire una solida alternativa. Tuttavia, non si può escludere che così facendo si generi un ingiustificato ottimismo rispetto al reale stato dell'arte dell'ingegneria: il focus concentrato unicamente sui successi potrebbe rischiare di offuscare la visione d'insieme che coinvolge inevitabilmente anche tutte quelle situazioni in cui si sono verificate criticità tali da compromettere sensibilmente la struttura. In aggiunta, è doveroso riconoscere che approfondire lo studio di determinate tipologie di incidenti permette di analizzare in maniera di volta in volta più precisa l'origine del fenomeno; al contrario, risulta piuttosto inutile cristallizzarsi sullo studio delle casistiche caratterizzate da un decorso privo di errori, in quanto non si sarebbe in grado di acquisire nuovi elementi[2]. Al massimo, in quest'ultimo caso, sarebbe possibile confermare la sicurezza di un dato sistema con una percentuale di affidabilità sempre crescente, senza tuttavia poter escludere che all'aumentare del numero di casi non si verifichi una situazione catastrofica o comunque critica. Al contrario, una volta che si sposta l'attenzione sugli insuccessi, diventa naturale eseguire studi statistici approfonditi che sono in grado di fornire informazioni molto utili, quali ad esempio:

- Percentuale attesa di collasso, ovviamente da intendere non in senso probabilistico (sarebbe necessario stabilire una legge fisico-matematica), bensì secondo una definizione empirica e quindi frequenziale;
- Sensibilità di determinate tipologie strutturali alle diverse categorie di insuccesso;
- Correlazione interna tra età e rischio di incidenti
- Confronto tra la distribuzione degli incidenti e quella della popolazione mondiale di strutture in vita, in modo da individuare una maggiore o minore predisposizione all'insuccesso

Se tutto questo vale per qualsiasi opere ingegneristica, il discorso acquisisce perfino più significato quando si parla di dighe e sbarramenti, che presentano una variabilità strutturale notevole e possono essere soggetti ad una moltitudine di problemi diversi, che spaziano da quelli più prettamente idraulici (sifonamento, overtopping) a quelli a carattere strutturale (terremoti, errori di design), senza dimenticare le criticità geotecniche (deformazioni del terreno, liquefazione dei terreni) o addirittura l'impatto umano (guerre e attentati terroristici)[3]. Inoltre, non è da sottovalutare l'attuale volontà, nel settore dell'Ingegneria Idraulica, di ottimizzare l'attuale popolazione di dighe e sbarramenti, rendendola sempre più intrinsecamente sicura; questo perché la disponibilità territoriale per opere dall'estensione necessariamente ampia diventa ogni anno minore e la nuova sfida è costituita dall'ottimizzazione degli invasi esistenti.

[1] Lempérière, «Design and Construction of Dams, Reservoirs, and Balancing Lakes»
[2] damfailures.org «Lessons Learned from Dam Incidents and Failures»
[3] Tracey Williamson, «Historic dam failures and recent incidents»

1.2 Obiettivi attesi

La tesi si prefigge come obiettivo primario l'analisi statistica e comparata delle informazioni riguardanti incidenti storicamente occorsi a dighe e sbarramenti su scala mondiale. Tale operazione presuppone una razionalizzazione dei dati provenienti sia dalla letteratura scientifica in merito, sia da alcuni database accessibili in linea, quali ad esempio ICOLD (internazionale), ARIA (Francese) e NPDP (statunitense). Si è quindi giunti alla realizzazione di quattro database distinti, di cui tre dedicati alla popolazione mondiale di dighe (ovvero "Small Dams", "Large Dams" e un terzo generato tramite ricalibrazione dei primi due, in modo tale da costituire la banca dati complessiva di confronto) e uno, che si distingue per il grado di dettaglio, contenente più di 3500 incidenti documentati. Alla luce di questo, lo studio a livello statistico si innesta su due livelli di indagine. Il primo punta a confrontare la popolazione di invasi con la relativa occorrenza all'interno del database incidenti, nell'ottica di evidenziare, per ogni categoria analizzata, quali siano le sottoclassi maggiormente sensibili a criticità. La correlazione interna al database incidenti consente invece di valutare l'impatto delle diverse tipologie di incidenti (per cui è stata creata un'apposita classificazione sintetica) sui parametri caratteristici di un invaso. La ricerca è infine corredata da approfondimenti su tecniche alternative a quella statistica per la stima del rischio connesso agli incidenti idraulici; in particolare, viene trattata diffusamente l'Event Tree Analysis delle tipologie di incidente di cui è stato possibile ricostruire l'albero di evento, oltre a presentare un esempio di calcolo della probabilità di collasso tramite ETA[4].

[4] Ferdous, Khan, Sadiq, Amyotte, Veitch, «»

2 I DATABASE CONSULTATI

2.1 Database ARIA

2.1.1 Informazioni generali

ARIA è un database che raccoglie gli eventi potenzialmente dannosi (o effettivamente tali) per l'ambiente, la sicurezza pubblica o la salute dei cittadini. Si tratta di una sigla che contraddistingue l'"***A**nalysis, **R**esearch and **I**nformation on **A**ccidents*", sviluppata dal BARPI, ovvero:

***B**ureau d'**A**nalyse des **R**isques et **P**ollution **I**ndustriels*

Ovvero un ente statale francese che lavora a stretto contatto con il Ministero della Transizione Energetica e solidale, nonché con la Direzione Generale della Prevenzione dei Rischi. La sua attività di ricerca si concentra principalmente nei seguenti ambiti[5]:

- Attività di produzione all'interno di impianti industriali, siti di costruzione, cave, fattorie, magazzini, etc…
- Distribuzione e impiego di combustibili gassosi
- Miniere e siti di stoccaggio sotterranei
- Trasporto di materiale pericoloso attraverso ferrovie, strade, canali, fiumi e mare
- Operazioni con equipaggiamento pressurizzato
- Sbarramenti e dighe (l'unica sezione presa in considerazione nel corso di questa analisi)

Il database contiene complessivamente (al 12/01/2019) più di 46000 incidenti documentati, di cui 547 relativi a dighe e sbarramenti. Si stima che circa 1200 nuovi casi vengano aggiunti ogni anno, oltre ad aggiornare quelli già esistenti, sulla base delle informazioni fornite da più fonti; nello specifico:

- I servizi di emergenza (pompieri, polizia, ospedali…) contribuiscono con la sequenza dinamica dell'incidente e le difficoltà intercorse al momento dell'intervento
- Le Autorità deputate all'Ispezione ambientale forniscono le cause dell'incidente
- Gli ordini professionali si occupano di corroborare l'analisi con altri elementi tecnici
- I media possono aggiungere la reazione della popolazione dell'area coinvolta.

L'idea di fondo è quella di costituire una memoria storica e tecnica degli incidenti, che consenta di minimizzare le conseguenze in futuro per eventi simili. Il database si presenta come espressamente non esaustivo, in quanto focalizzato in maniera privilegiata sui siti più a rischio.

[5] BARPI, «Inventaire des accidents survenus en 2015»

2.1.2 Metodo di ricerca

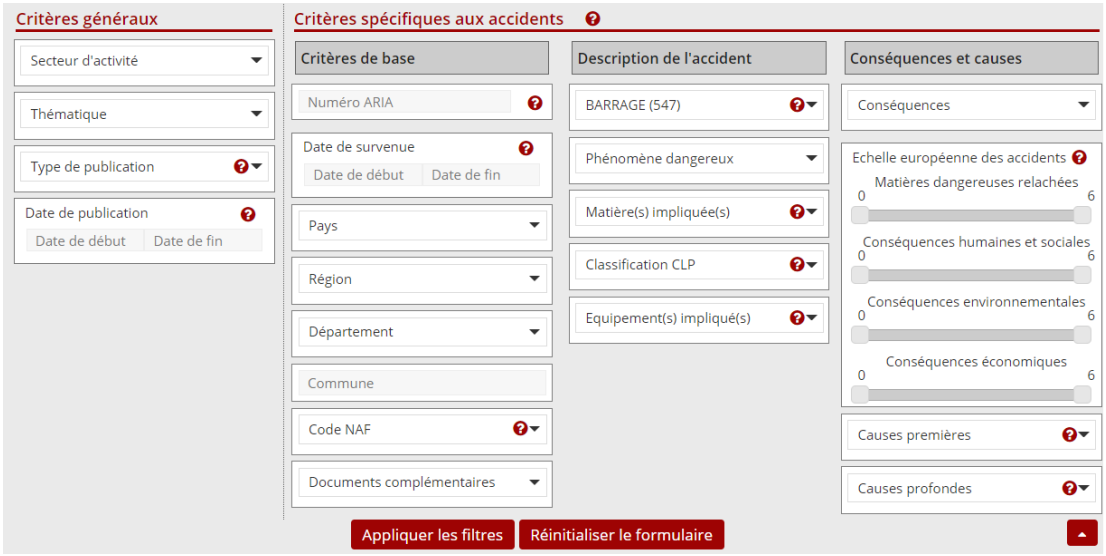


Figura 1 – Barra di ricerca Database ARIA

L'interfaccia di ricerca (Figura 1) consente di selezionare tutta una serie di opzioni per affinare la ricerca degli incidenti. Oltre al necessario restringimento dell'analisi ai "Barrage" ("Diga" in Francese), i filtri più utili riguardano il Paese (ed eventualmente le sue suddivisioni territoriali), la data, le cause, sia scatenanti che predisponenti, le conseguenze e la Scala Europea degli Incidenti. Quest'ultimo è un parametro che acquista importanza nel momento in cui si vuole operare un confronto numerico tra la gravità di più incidenti in quattro ambiti differenti, che ricevono ognuno una valutazione di intensità crescente da 0 a 6[6]:

- Materiale pericoloso rilasciato
- Conseguenze sulla salute umana e sociali
- Conseguenze ambientali
- Conseguenze economiche

Una volta avviata la ricerca, si accede ad una lista di schede individuali di incidente, il cui aspetto-tipo è il seguente (Figura 2):

Figura 2 – Visualizzazione dati scheda ARIA

[6] DIMENC, «Le Risque Industriel» (2014)

Nell'ordine, si possono individuare una breve presentazione dell'incidente, un numero progressivo, la data, la collocazione geografica, la scala dell'incidente (per via grafica) e infine la descrizione testuale. A corredo delle schede più dettagliate si possono trovare anche foto o ricostruzioni grafiche, nonché documentazione di approfondimento[7].

2.1.3 Punti di forza

- La Scala Europea del Danno, associata ad ogni incidente, consente un primo confronto numerico tra incidenti di natura diversa
- L'aggiunta di materiale fotografico ad alcune schede rende ARIA più innovativo dei tipici database unicamente testuali presenti in rete
- Presenza di scenari di "Lesson Learned" e focus diffuso sulle misure intraprese per scongiurare futuri incidenti

2.1.4 Punti di debolezza

- Gli incidenti documentati che riguardano dighe o sbarramenti rappresentano poco più dell'1% dei casi totali; inoltre, anche all'interno di questa esigua proporzione, un numero non trascurabile di insuccessi idraulici è legato all'ambito minerario, non preso in considerazione nel corso della presente analisi a causa del diverso comportamento reologico
- Il database ARIA appare fortemente incentrato sul settore secondario francese e offre un numero limitato di informazioni a livello internazionale
- La maggior parte delle schede assicura soltanto una breve descrizione dell'incidente, venendo a mancare spesso elementi chiave quali le modalità di sviluppo della criticità, gli elementi maggiormente coinvolti e le cause predisponenti
- Il database risulta esportabile in formato .xls; tuttavia, all'interno dello stesso, la descrizione delle cause appare quanto mai vaga e difficile da mettere in relazione con lo schema di cause razionalizzate preso in considerazione a pag. … della presente tesi

[7] ARIA, «Release of 50 million m3 of water at the Vajont Dam»

2.2 Database NPDP

2.2.1 Informazioni generali

Con la sigla "NPDP" si intende il "**N**ational **P**erformance of **D**ams **P**rograms", sviluppato e curato direttamente dall'Università di Stanford. Esso è stato ideato all'inizio degli anni Novanta e lanciato ufficialmente nel 1994, venendo aggiornato di anno in anno con nuovi dati inerenti alla distribuzione statunitense e mondiale delle dighe, nonché con esempi di insuccessi idraulici di vario tipo. L'obiettivo di fondo resta quello di offrire ai professionisti del settore uno strumento di consultazione che monitori lo stato in servizio di dighe e sbarramenti, garantendo inoltre un'ampia documentazione multimediale correlata agli stessi. Si tratta di un database ad accesso libero che non richiede nemmeno una registrazione gratuita[8]. Per dare un'idea della portata di tale database, vengono di seguito presentati alcuni dati significativi:

- Il database conta 84100 dighe al 2009
- Solo il 2,7% di queste è di proprietà del Governo Federale
- L'81% delle dighe inventariate è realizzato in terra
- L'8% del totale include più di una tipologia strutturale
- 1595 dighe ritenute a rischio sono posizionate a meno di un miglio dalla città a valle più vicina
- Ben 20 dighe all'interno del database vennero completate già nel 18esimo secolo
- La più antica diga documentata risale al 1640 (Old Oaken Bucket Pond Dam in Massachusetts)

2.2.2 Metodo di ricerca

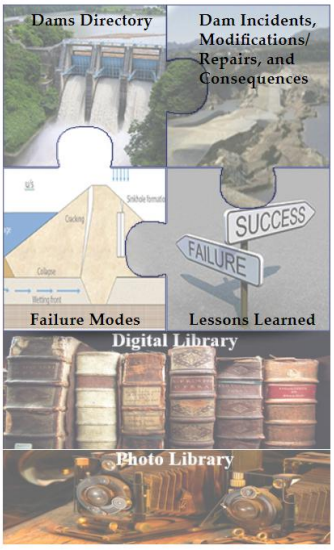


Figura 3 – Schermata di accesso alle varie funzioni del Database NPDP

[8] Martin W. McCann, «National Performance of Dams Program An Archive of Dam Information and Experience»

Il database si suddivide in sei sezioni principali (Figura 3). Le ultime due, ovvero “Digital Library” e “Photo Library” accolgono rispettivamente: le pubblicazioni scientifiche che la Stanford ritiene attinenti alla sicurezza di dighe e sbarramenti e una documentazione fotografica delle opere idrauliche contenute all’interno del database. “Failure Modes” e “Lesson Learned” forniscono invece tutta una serie di elementi di analisi post-incidente, i quali, sebbene non direttamente correlati a incidenti realmente avvenuti e documentati nel database, posso costituire una solida base di studio dei fenomeni generali che conducono ad una determinata tipologia di insuccesso idraulico. Le due directory di maggiore interesse ai fini della presente analisi restano tuttavia le prime due, in modo tale da poter mettere a confronto la popolazione totale di dighe indicizzate all’interno del NPDP e il campione di incidenti estratto dalla stessa.

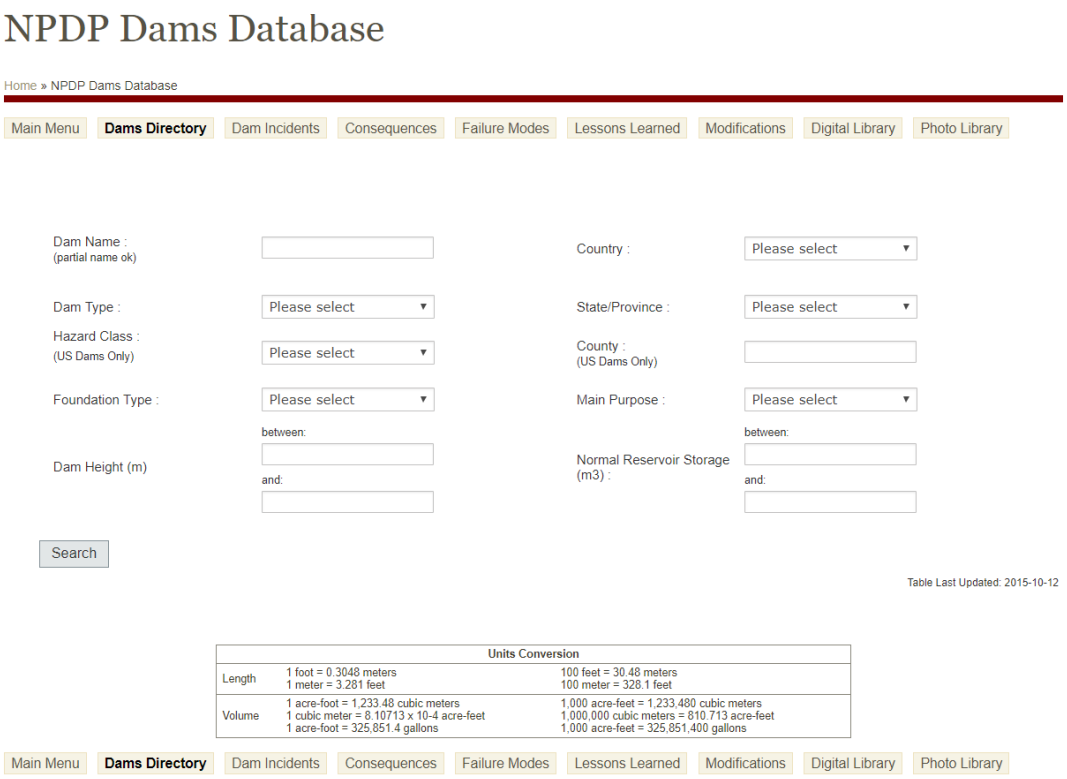


Figura 4 - Criteri di ricerca database dighe NPDP

I filtri di ricerca della “Dams Directory” (Figura 4) permettono di gestire i principali parametri che intervengono nell’ambito dell’analisi-tipo di dighe e sbarramenti: tipologia strutturale, altezza, geolocalizzazione e capienza. Ad essi si aggiungono altri criteri utili (e generalmente poco trattati) quali il tipo di fondazione, la funzione principale e la Classe di Rischio, un metro di valutazione adottato unicamente per le opere su suolo statunitense che va a gerarchizzare le dighe in base alla loro pericolosità intrinseca[9].

[9] FEMA, «Federal Guidelines for Dam Safety»

Search Terms:

- Country: United States

New Search

Records found: **85225** [1 2 3 4 5 6 7 8 9 10] Next : Last Page **1** of **3409** Records Per Page: 25

Dam Name Links to Dam Record	Country	State/Province	Dam Type	Hazard Class	Main Purpose	Dam Height (m)	Normal Reservoir Storage (m3)
Cooper Lake	United States	Alaska	Earth	Significant	Hydroelectric	15.9	138,149,967.8
Blue Lake	United States	Alaska	Arch	High	Hydroelectric	43.9	179,101,565.4
Salmon Creek	United States	Alaska	Arch	High	Hydroelectric	51.8	14,801,782.3
Annex Creek	United States	Alaska	Other	Low	Hydroelectric	6.1	28,863,475.4

Figura 5 - Output ricerca database NPDP

L'output di tale ricerca, a prescindere dai parametri impostati, mostra nell'ordine il nome dell'opera, lo Stato (e l'eventuale suddivisione territoriale) di appartenenza, la tipologia strutturale, la classe di rischio, la funzione principale, l'altezza in [m] e la capienza del bacino in condizioni standard, in [mc] (Figura 5).

Main Menu | Dams Directory | **Dam Incidents** | Consequences | Failure Modes | Lessons Learned | Modifications | Digital Library | Photo Library

Dam Name : (partial name ok)

Country : Please select

State/Province : Please select

Normal Reservoir Storage (m3): between: and:

Uncontrolled Release of the Reservoir: Please select

Incident Type :

Dam Type : Please select

Dam Height (m) : between: and:

Search

Table Last Updated: 2018-12-22

Figura 6 - Criteri di ricerca database incidenti NPDP

La sezione "Dam Incidents" (Figura 6) raccoglie invece tutti i casi di insuccesso idraulico (non soltanto catastrofici, bensì anche semplicemente superamenti dalla soglia di sicurezza) documentati all'interno del database[10]. Oltre ai criteri già illustrati per il database delle dighe, è possibile filtrare l'output rispetto alla tipologia di incidente e all'eventualità di un rilascio incontrollato della riserva idrica.

[10] Martin W. McCann, «National Performance of Dams Program An Archive of Dam Information and Experience»

Search Terms:
- Country: United States

New Search

Records found: **3482** [1 2 3 4 5 6 7 8 9 10] Next : Last Page **1** of **175** Records Per Page: 10

Full Record	Dam Name Links to Dam Record	Country	State/Province	Incident Date	Incident Type	Dam Type	URR
View	Tallulah Falls	United States	Georgia	11/25/2017	Gate Structural Failure	Gravity; Arch	No
View	North Fork	United States	Oregon	10/22/2017	Gate Misoperation	Arch	No
View	Development No. 1 Dam	United States	Oregon	9/28/2017	Gate Misoperation	Concrete; Gravity; Arch	No

Figura 7 - Output ricerca incidenti database NPDP

Il risultato di tale ricerca restituisce un numero piuttosto limitato di informazioni, concernenti principalmente le caratteristiche sintetiche dell'incidente (Figura 7). Se invece si vuole mettere in relazione l'insuccesso con le proprietà dell'opera idraulica presso cui si è verificato, nonché considerare i Record per cui esiste un serio approfondimento dei meccanismi di incidente, conviene fare riferimento alla voce "Consequences", che in maniera del tutto analoga a "Dam Incidents" genera il seguente output (Figura 8):

Details found: **3012** [1 2 3 **4** 5 6 7 8 9 10] Next : Last Page **4** of **151** Records Per Page: 20

Full Record	Dam Name Links to Dam Record	Country	State/Province	Dam Height (m)	Dam Type	Normal Reservoir Storage (cu. m)	Incident Type ↓	Uncontrolled Release of the Reservoir	Total Fatalities	Total Economic Loss
View	Sid White	United States	Washington	4.3			Seepage	Yes		
View	Wilcox	United States	Utah				Seepage	Unknown	0	0 USD
View	Caulk Lake Dam	United States	Kentucky	20.1	Earth		Seepage	Yes		
View	Jackson Reif Dam	United States	Wisconsin				Seepage	Yes		
View	Winter	United States	Wisconsin	7.6			Seepage	Unknown		
View	Coon Creek 41	United States	Wisconsin	11.9	Earth		Seepage	Yes		590,000 USD

Figura 8 - Output incidenti con conseguenze database NPDP

In questo modo, è possibile reperire informazioni anche sulle conseguenze economiche e in termini di perdite umane dell'incidente, e in generale correlare immediatamente tutti i dati essenziali.

2.2.3 Punti di forza

- NPDP rappresenta l'unico database, tra quelli presi in esame, capace di mettere direttamente in relazione una popolazione estesa di dighe con gli incidenti avvenuti nell'ambito di queste ultime. In tutti gli altri casi sarà necessario affiancare basi di dati strutturali con informazioni sulla sicurezza idraulica proveniente da altre fonti[11]
- Il database accoglie anche opere idrauliche (e relativi incidenti) di altezza inferiore ai 5 metri, che tra l'altro dovrebbero rappresentare oggetto privilegiato di analisi in quanto estremamente comuni in ambito locale; l'equivalente ICOLD, malgrado l'approccio decisamente più internazionale e dettagliato, si concentra unicamente sugli sbarramenti più alti di tale soglia
- Possibilità di accesso alle singole schede recanti ulteriori dati
- Presenza di materiale multimediale di approfondimento

[11] Martin W. McCann, «National Performance of Dams Program An Archive of Dam Information and Experience»

2.2.4 Punti di debolezza

- Le singole voci mancano frequentemente di alcuni dati sensibili, per di più in maniera altamente disomogenea (alternativamente altezza, materiale impiegato, anno di fondazione, tipologia di incidente, ecc…), rendendo difficile estrarre un database organico a meno di ovviare tramite confronto con altri servizi online (ICOLD e FEMA in particolare)
- Forte deviazione statistica verso i dati statunitensi, in particolare per le piccole dighe (90% del totale)

2.3 Database ICOLD

2.3.1 Informazioni generali

Il database internazionale ICOLD nasce per volontà dell'omonima istituzione "**I**nternational **C**ommission **O**n **L**arge **D**ams", un'organizzazione non governativa che punta a creare una condivisione su scala internazionale dello stato dell'arte dell'Ingegneria delle Dighe. Il suo obiettivo privilegiato risiede nella salvaguardia della sicurezza in ambito idraulico, nonché nella protezione dell'ambiente e nel progresso scientifico. A partire dal 1928, anno della sua fondazione, ICOLD si è sempre prodigata ad incoraggiare l'ottimizzazione dei processi costruttivi legati a dighe e sbarramenti, attraverso la raccolta e conseguente diffusione di informazioni tecniche a riguardo. Nel corso degli ultimi decenni, il focus si è spostato sulla sicurezza, il monitoraggio delle opere più datate e lo studio degli effetti di fatica e deterioramento ambientale sulle stesse.

In base ad una scelta intrapresa già al momento della redazione del proprio Atto Costitutivo, ICOLD ha deciso di concentrarsi unicamente sulle "Large Dams", fornendo naturalmente una descrizione atta a distinguere queste ultime all'interno dell'ampio panorama mondiale delle opere idrauliche:

"*A dam with a height of 15 metres or greater from lowest foundation to crest or a dam between 5 metres and 15 metres impounding more than 3 million cubic metres****"***[12]

Di conseguenza, come sarà approfondito in seguito, il database ICOLD dimostrerà una notevole robustezza per dighe di altezza superiore ai 15 metri (rappresentando addirittura l'unica fonte affidabile e completa a livello internazionale), diventando tuttavia meno accurato tra i 5 e i 15 metri e non offrendo alcuna informazione per i piccoli sbarramenti, che al contrario richiederebbero uno studio approfondito in quanto fortemente sensibili a incidenti e crolli[13]. Da ciò si origina la necessità di integrare tale base di dati con il supporto dei database NPDP e FEMA.

2.3.2 Metodo di ricerca

Il "World Register of Dams" è un database ad accesso a pagamento che raccoglie (al 14/01/2019) informazioni dettagliate su 58 000 dighe distribuite in tutto il pianeta. Oltre all'ampia disponibilità di dati, questa raccolta si distingue anche per l'accessibilità offerta dal motore di ricerca (Figura 9).

[12] ICOLD, «Constitution of ICOLD (2011) ».
[13] ANCOLD, «Consequence Screening Tool for Small Dams»

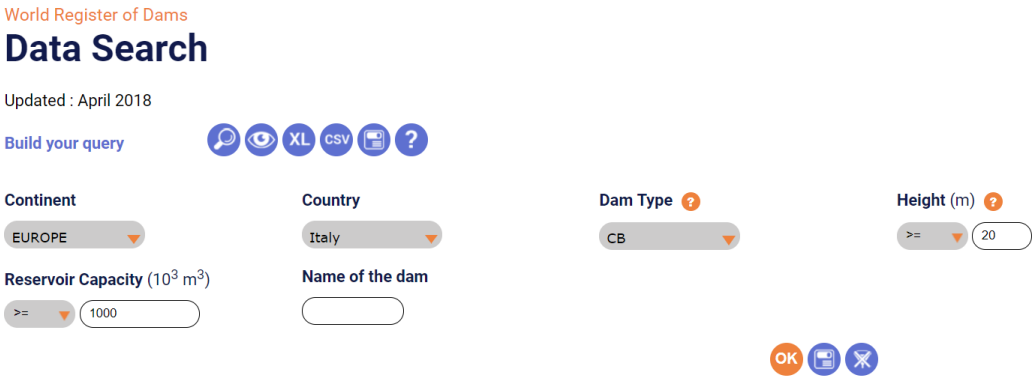


Figura 9 - Barra di ricerca database ICOLD

I criteri di filtraggio base suggeriti dal database riguardano, come di consueto, la tipologia strutturale, la geolocalizzazione, l'altezza e il volume di invaso standard. La ricerca è tuttavia estendibile secondo tutta una serie di parametri di seguito mostrati (Figura 10):

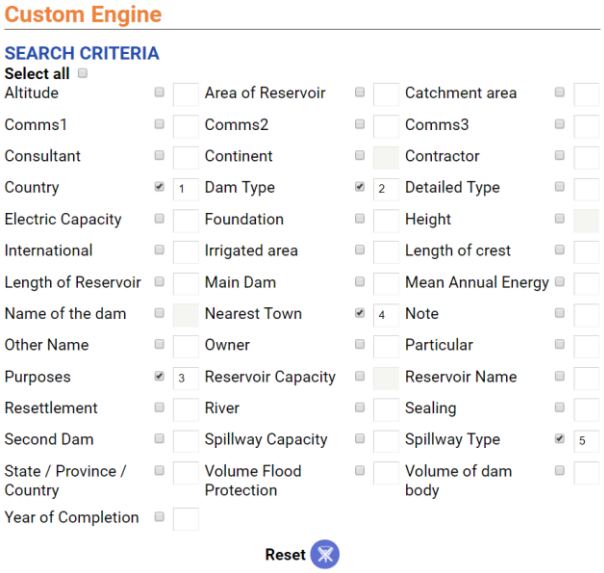


Figura 10 - Criteri di ricerca database ICOLD

Senza soffermarsi ad analizzare ogni singola voce, le alternative più interessanti sono costituite dalla possibilità di filtrare la ricerca secondo l'anno di completamento, la funzione espletata dallo sbarramento (idroelettrico, di contenimento piene, depurazione…), il centro abitato più prossimo (in previsione di analisi di rischio, ad esempio) e il tipo di fondazione, per considerazioni a carattere geotecnico. Ogni proprietà è gerarchizzabile in base ad un indice numerico impostabile dall'utente. Una schermata pressoché identica è prevista anche per la visualizzazione di output, in modo da potersi concentrare sulle informazioni strettamente necessarie. Una volta impostata la ricerca, si perviene alla lista dei risultati (Figura 11).

Results : 26 1 Show 100 Entries

Continent	Country	Dam Type	Height (m)	Reservoir Capacity (10^3 m^3)	Year of Completion	PDF
EUROPE	Italy	CB	58	91 100	1 984	
EUROPE	Italy	CB	112	30 410	1 953	
EUROPE	Italy	CB	63	61 440	1 949	

Figura 11 - Visualizzazione di output ricerca Database ICOLD

Le colonne stampate a schermo sono limitate a quelle indicate nella precedente fase di filtraggio; ad esse si aggiunge, ove presente, una scheda di approfondimento in formato PDF, contenente in maniera sintetica tutti i dati relativi alla diga in questione (Figura 12).

CIGB ICOLD
COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES
INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS
The World Register Of Dams

Continent	EUROPE
Country	Italy
Name of the dam	ALTO TEMO
Second Dam	
Main Dam	
Reservoir Name	
Year of Completion	1984
Particular	
International	
River	Temo
Nearest Town	Sassari
State / Province / Country	Sardegna
Dam Type	CB
Sealing	hc
Foundation	

Figura 12 - Scheda approfondimento diga Database ICOLD

2.3.3 Punti di forza

- E' l'unico database accessibile online che raccolga dati in maniera sufficientemente omogenea in tutto il mondo
- Il grado di dettaglio di ogni voce può essere aumentato e diminuito a piacere
- Le schede associate ad una determinata diga offrono una grande quantità di informazioni riassunta in modo efficiente
- La possibilità di esportare la ricerca in più formati rende l'analisi dei dati decisamente agevole

2.3.4 Punti di debolezza

- Il database risulta affidabile soltanto per le opere che superano i 15 metri; la densità di dighe al di sotto di tale soglia appare molto inferiore alle statistiche mondiali (dato il vincolo di ampiezza del bacino). Inoltre non vi è alcun riferimento agli sbarramenti minori di 5 metri
- Il database in sé non fornisce informazioni riguardo agli insuccessi idraulici connessi alle dighe in esame, sebbene ICOLD si sia dedicata ampiamente al trattamento di questo tipo di dati; per completare l'analisi è necessario fare riferimento ad alcuni bollettini emanati dall'ente stesso e acquistabili a parte. In particolare, si segnala l'edizione numero 99, che, seppur datata 1995, costituisce la fonte più aggiornata attualmente disponibile in ambito ICOLD[14]

[14] ICOLD, "Bulletin 99" (1995)

2.4 Database NID

2.4.1 Informazioni generali

La sigla NID indica il "**N**ational **I**nventory of **D**ams", un database strettamente statunitense di dighe e sbarramenti, comunemente ritenuta la fonte più completa e affidabile a livello nazionale negli USA in questo ambito di ricerca. E' stato sviluppato direttamente dall'Esercito grazie all'opera della Commissione interna denominata "Corps of Engineers"[15]. Se da un lato le sue informazioni tendono a sovrapporsi con quelle fornite dal NPDP, dall'altro il dettaglio di approfondimento risulta di gran lunga maggiore, sebbene circoscritto al territorio nazionale.

2.4.2 Metodo di ricerca

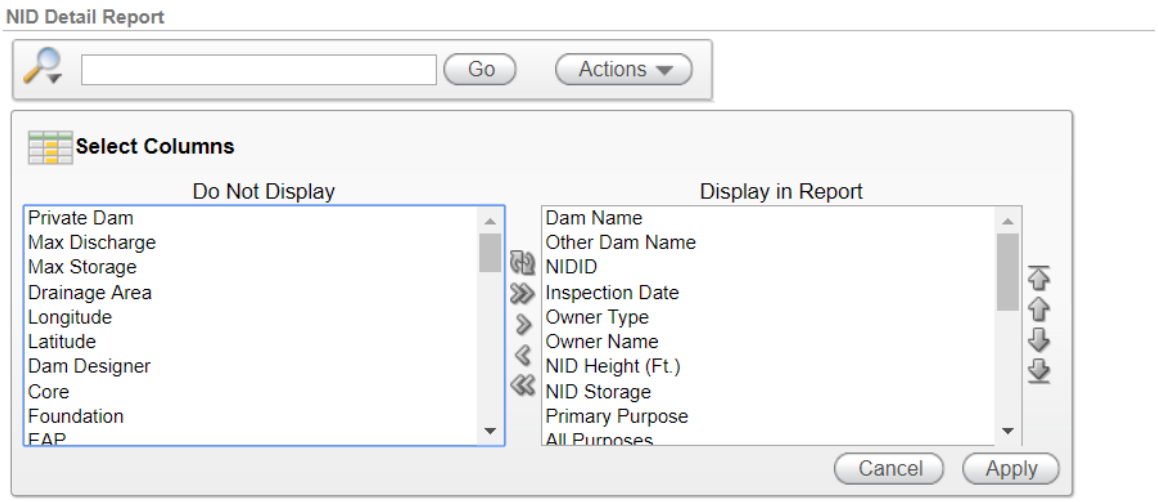


Figura 13 - Barra di ricerca Database FEMA

La barra di ricerca del database in esame risulta fortemente personalizzabile, attraverso una trentina di parametri che possono essere attivati o meno nell'output finale di volta in volta (Figura 13). Trattandosi di un database governativo, molti criteri presentano un carattere amministrativo di scarso interesse per la nostra analisi (ad esempio il proprietario del bacino o la circoscrizione elettorale in cui ricade lo stesso). In coerenza con i ragionamenti illustrati in precedenza, si procederà a selezionare piuttosto parametri tipicamente strutturali, avendo l'accortezza di attenersi il più possibile alle modalità di visualizzazione del database NPDP (che si ricordano essere non personalizzabili) in modo da poter operare un successivo confronto tra le due fonti nell'ottica di irrobustire la qualità dei dati legati agli USA. Grazie al NID si ha inoltre l'opportunità di risalire, per buona parte dei record totali, all'anno di costruzione della diga, informazione utile sia per integrare il database NPDP, sia soprattutto per migliorare la qualità del calcolo dell'età dei bacini al momento dell'incidente. Va sottolineato che il dato relativo all'altezza è espresso in piedi, di conseguenza richieda la conversione nel Sistema Internazionale:

$$1\ foot = 0{,}3048\ meters$$

[15] US Army, "Guide to National Inventory of Dams"

L'output che si ottiene inserendo i principali fattori di interesse sopra descritti è il seguente (Figura 14):

Dam Name	NID Height (Ft.)	NID Storage	Primary Purpose	Dam Type	State	Year Completed
CLYDE POWELL	18	60	Recreation	Earth	AL	1965
LAKE CARRONA NO 2	20	130	Recreation	Earth	AL	1945
BUTLER COUNTY NUMBER ONE	35	294	Recreation	Earth	AL	1949
FRAZIER DAM	30	120	Debris Control	Earth	AL	1910
COFFEE COUNTY PUBLIC LAKE DAM	23	657	Recreation	Earth	AL	1950
SAWYER LAKE DAM	20	120	Recreation	Earth	AL	1966
COLLEY POND	36	196	Recreation	Earth	AL	1946

Figura 14 - Visualizzazione di output Database FEMA

2.4.3 Punti di forza

- Contrariamente al database NPDP, è possibile filtrare la visualizzazione finale secondo i parametri ritenuti più significativi
- Possibilità di inserire l'anno di costruzione direttamente nella tabella, senza dover accedere alla singola scheda per estrarlo
- Completezza dei dati per ogni record
- Possibilità di rappresentare la ricerca anche sotto forma grafica attraverso una carta interattiva in formato GIS degli Stati Uniti d'America

2.4.4 Punti di debolezza

- La disponibilità di dati è circoscritta unicamente agli USA
- Impossibilità di esportare direttamente il database nei formati più comuni (.csv, .xls, ecc…); occorre quindi eseguire l'estrazione Stato per Stato
- Problemi di memoria associati alla visualizzazione di dati (difficile far stampare a schermo più di 4000 voci contemporaneamente)

2.5 Database testuali

A completamento dei database interattivi disponibili online, è comunque necessario ricorrere a dati provenienti da studi indipendenti; questo nell'ottica di integrare la ricerca con informazioni altrimenti carenti, quali ad esempio:

- Piccole dighe e relativi incidenti, in quanto completamente trascurati da ICOLD e generalmente non esaustivi
- Opere idrauliche in Paesi tradizionalmente restii a fornire informazioni riguardo al proprio sistema idraulico (ad esempio per ragioni di sicurezza nazionale) oppure poco coinvolti nei progetti online; un singolo scienziato, tramite contatti istituzionali, può avere accesso a materiale riservato a disposizione di un determinato Ministero[16]
- Periodi temporali più particolari, estremamente recenti oppure anteriori al 1900

Malgrado le pubblicazioni vadano a trattare una quantità di incidenti piuttosto limitata, questi ultimi presentano un livello di approfondimento maggiore; inoltre, difficilmente i dati vengono presentati sotto forma di semplice tabella, bensì la consuetudine resta quella di illustrare una serie di "Case studies" che consentono, in aggiunta alla tradizionale analisi, l'interpretazione dei meccanismi di collasso, l'entità del danno su ambiente e popolazione e le misure post-incidente intraprese.

2.5.1 "History of Dam Failures"[17]

La pubblicazione in questione pone l'accento sui collassi di dighe situate in territorio indiano e australiano, tradizionalmente poco trattate in ambito di letteratura. Contiene inoltre informazioni idrologiche utili a stimare l'impatto delle portate di piena sulle opere idrauliche.

2.5.2 "Overtopping of four smalls dams in Czech Republic"[18]

Si tratta di uno studio comparato sulla risposta di quattro diversi sbarramenti costruiti su due fiumi diversi della stessa regione della Repubblica Ceca, e sottoposti ad un'alluvione di natura ciclonica (Figura 15). Al netto dell'apporto contenuto in termini di singole voci, questo paper affronta il fenomeno dell'overtopping dal punto di vista matematico, proponendo un modello fisico applicabile a casi analoghi

[16] https://www.sacbee.com/news/state/california/water-and-drought/article141963119.html
[17] Prof. B.S. Thandaveswara, «Hydraulics (2014) ».
[18] Alhasan, Jandora, e Říha, «Study of Dam-Break Due to Overtopping of Four Small Dams in the Czech Republic».

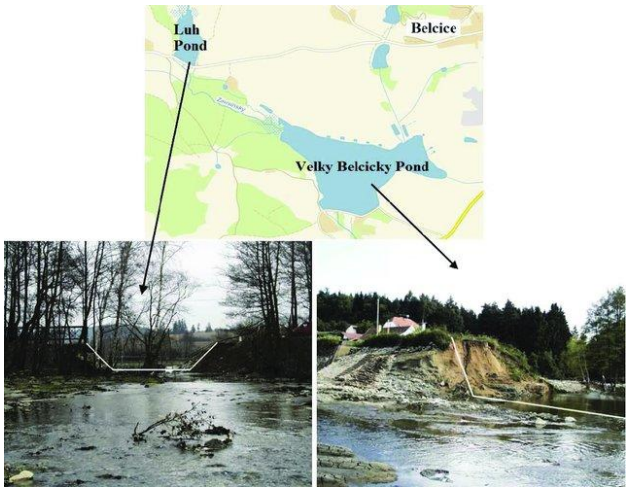


Figura 15 - Due delle quattro dighe crollate per Overtopping in Repubblica Ceca

2.5.3 "Case Histories of Earthen Dam Failures"[19]

L'articolo analizza le cause più comuni di collasso delle dighe in terra, ovvero Overtopping e Internal Erosion, attraverso l'illustrazione di alcuni casi studio notevoli per ciascuna delle due tipologie di incidente. Inoltre, il confronto risulta corredato da fotografie post-evento che chiarificano i singoli fenomeni

2.5.4 "Three Cases of Italian Dam Failures"[20]

Le tre dighe di Molare, Stava e Gleno (Figura 16) assicurano un'ampia panoramica della situazione italiana in quanto esemplificano tre modelli strutturali dalla forte diffusione (ad arco, a speroni, in terra) e che hanno subito modalità di crollo significativamente diverse. In questo caso la trattazione di ogni incidente appare eccezionalmente dettagliata, quasi una sorta di piccola relazione tecnica sull'accaduto, non a caso dotata di documentazione fotografica originale e immagini satellitari per inquadrare l'area dell'evento.

Figura 16 - I resti della Diga di Gleno (BG, Italia)

[19] Sharma e Kumar, «Case Histories of Earthen Dam Failures».
[20] Luino, Tosatti, e Bonaria, «Dam Failures in the 20th Century: Nearly 1,000 Avoidable Victims in Italy Alone».

2.5.5 “Concrete Dams Case Studies”[21]

Il paper, realizzato per conto di alcune agenzie governative statunitensi, offre una casistica di incidenti piuttosto approfondita, andando tra l’altro ad evidenziare quale possa essere il punto debole delle principali tipologie strutturali di dighe e sbarramenti. Anche in questo caso non mancano le informazioni multimediali, a cui si aggiungono schemi fisici dei fenomeni coinvolti; particolare interesse è riservato al tema del rapporto tra opere idrauliche e terremoti, che sta acquistando importanza sempre maggiore.

2.5.6 “ARUP Database”[22]

Si tratta di un bollettino commissionato dalla British Dam Society al fine di elaborare uno scenario zero del livello di sicurezza delle dighe del Regno Unito. Al fine di operare un confronto tra gli incidenti a livello mondiale e le criticità riscontrate sulle opere idrauliche nazionali, vengono presentanti due piccoli database, principalmente dedicati alle dighe in terra, i quali, oltre alle tradizionali informazioni strutturali e sulla tipologia di evento, prendono in considerazione il numero di vittime stimate.

2.5.7 “Case Histories of Earthen Dam Failures”[23]

Il documento in questione si presenta come una raccolta di una decina di casi studio dal risalto internazionale, suddivisi per tipologia di incidente. Le descrizioni approfondite e accurate dal punto di vista tecnico sono accompagnate da fotografie post-evento. Gli autori indiani Sharma e Koumar (per conto del Missouri Institute) si sono inoltre impegnati a realizzare una descrizione generale dei principali fenomeni catastrofici legati al crollo di dighe e a suggerire integrazioni di sicurezza o strutturali per scongiurare incidenti analoghi.

[21] Chuck Anderson, Caroline Mohorovic, Larry Mogck, Bitsy Cohen, Gregg Scott, «Concrete Dams Case Histories of Failures and Nonfailures with Back Calculations».
[22] Williamson, «Historic Dam Failures and Recent Incidents».
[23] Sharma e Kumar «Case Histories of Earthen Dam Failures».

3 STUDIO DATABASE DIGHE

3.1 Grandi dighe

3.1.1 Introduzione generale

Non esiste una definizione unanimemente accettata di "Grande diga" ("Large Dam" in Inglese). Questo perché, in particolare, non è realistico immaginare una frontiera netta dopo il cui attraversamento un bacino si comporti in maniera sufficientemente diversa da poter essere studiato come un'opera a sé stante dal punto di vista idraulico o strutturale. Per questioni di categorizzazione, come spesso avviene nel dominio dell'Ingegneria, risulta ugualmente utile imporre una suddivisione il più possibile definita su basi tecnico-geometriche e condivisibile a livello mondiale. Conviene tendenzialmente affidarsi alla definizione di ICOLD, che non a caso rappresenta la Commissione Internazionale sulle Grandi Dighe; dovendo circoscrivere il proprio campo d'azione, ICOLD ha prodotto e affinato nel tempo una definizione di "Large Dam" a cui ormai fa affidamento la maggior parte degli esperti in materia[24]:

Con il termine 'Grande Diga' s'intende una diga che abbia un'altezza di almeno 15 metri dalla fondazione fino alla cresta (Figura 17).

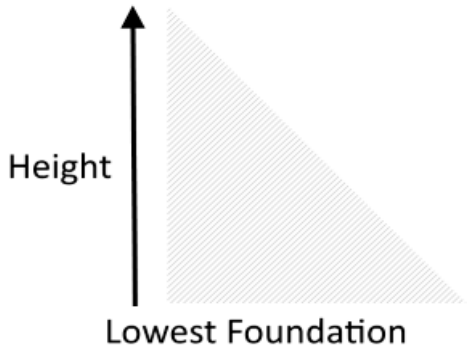


Figura 17 - Definizione grafica del parametro "Height"

Nel caso in cui tale criterio non risultasse soddisfatto, è comunque possibile classificare un bacino di altezza compresa tra i 10 e i 15 metri, purché si verifichino anche le seguenti condizioni:

- Lunghezza della cresta maggiore di 500 metri
- Capacità di smaltimento attraverso lo sfioratore principale non inferiore ai 2000 mc/s
- Volume di invaso superiore al milione di metri cubi
- Problemi particolari per quanto riguarda le fondazioni
- Progetto non convenzionale

[24] ICOLD, «Bulletin 99»

Applicando tale definizione al patrimonio internazionale di dighe e sbarramenti, si stima la presenza di circa 58000 invasi meritevoli di essere definiti "Large Dam"[25]

E' possibile tuttavia incontrare ulteriori suddivisioni della categoria "Large Dams", con particolare riguardo a quelle opere la cui portata rischierebbe di non consentire un confronto adeguato con le caratteristiche medie delle grandi dighe. Si tratta ad esempio dei "Major Dam Projects", che vanno a individuare i bacini più ambiziosi in ottica strutturale o funzionale. Per rientrare in questa categoria, bisogna soddisfare uno o più delle seguenti limitazioni:

- Altezza superiore ai 150 metri
- Volume di invaso maggiori di 15 milioni di metri cubi
- Capacità di produzione di energia non inferiore ai 1000 MW

Non dovrebbero esistere più di 350 impianti capaci di rispettare i criteri sopra illustrati (un esempio è costituito dalla Diga delle Tre Gole, Figura 18)[26]

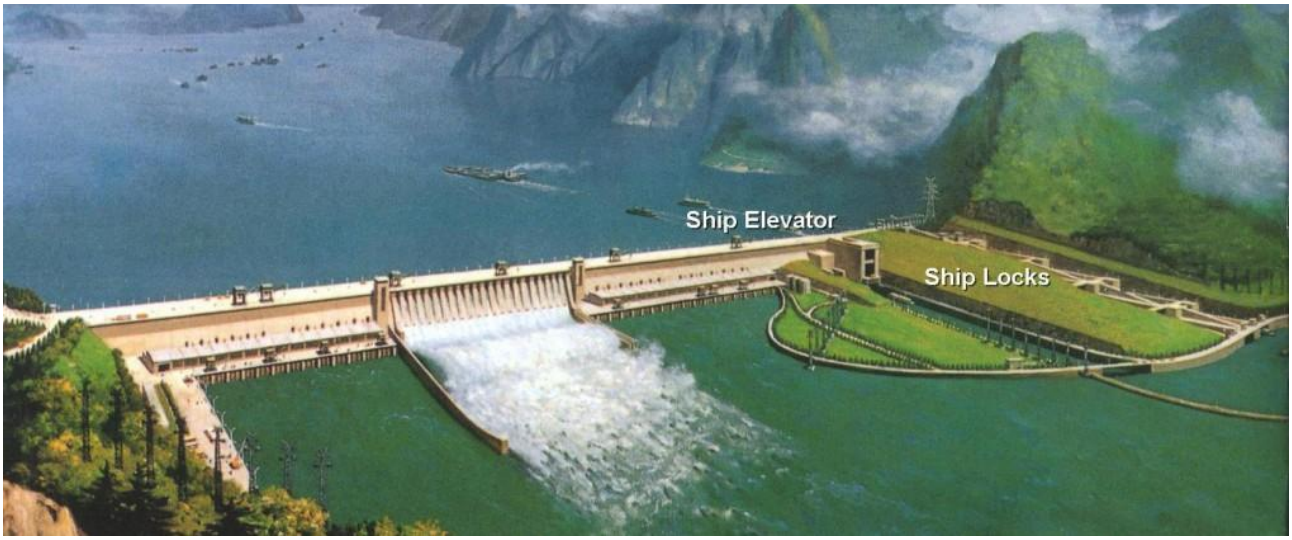


Figura 18 - La Diga delle Tre Gole (Cina), la più grande al mondo, in ricostruzione grafica

Ritornando alla definizione presentata da ICOLD e perfettamente rispettata all'interno del suo database (World Register of Dams), si evidenziano da subito i limiti di indagine che essa pone: malgrado la ricerca risulti sostanzialmente accurata per le dighe sopra i 15 metri, la presenza di criteri fortemente stringenti per i bacini di altezza inferiore tende a filtrare esageratamente una popolazione di piccoli impianti che invece richiederebbe perfino maggiore riguardo, in quanto spesso trascurata dal punto di vista della sicurezza[27]. Inoltre, se per le dighe di altezza superiore ai 10 metri vi è la possibilità di essere inserite nel database a patto di possedere un invaso di dimensioni congrue (o in alternativa particolati strutturali ritenuti critici in base ai criteri precedentemente esplicitati), non è prevista alcuna informazione per gli impianti ancora più bassi, sebbene il loro numero, ovviamente più incerto, sia stimato intorno alle 800 000 unità[28].

[25] ICOLD, «Guide to the World Register of Dams »
[26] WWF International Discussion Paper, «A Place for Dams in The 21st Century? »
[27] http://www.australasianscience.com.au/article/issue-june-2013/small-dams-create-bigger-problems.html
[28] WWF International Discussion Paper, «A Place for Dams in The 21st Century? »

A fronte di queste constatazioni e al fine di fotografare in maniera più organica possibile la situazione mondiale, si è scelto di suddividere l'analisi della popolazione di dighe tra quelle superiori e quelle inferiori ai 15 metri, senza applicare ulteriori eccezioni; tale operazione permette in particolare di scindere l'analisi su due database diversi: ICOLD per le "Large Dams" e NPDP per le "Small Dams". La decisione di non consultare il database ICOLD per intero (ovvero di trascurare specificatamente gli impianti tra i 10 e i 15 metri, visto che non rappresenterebbero la casistica completa) si spiega con la volontà di massimizzare la coerenza interna di ogni singola analisi statistica.

3.1.2 Distribuzione per Continente

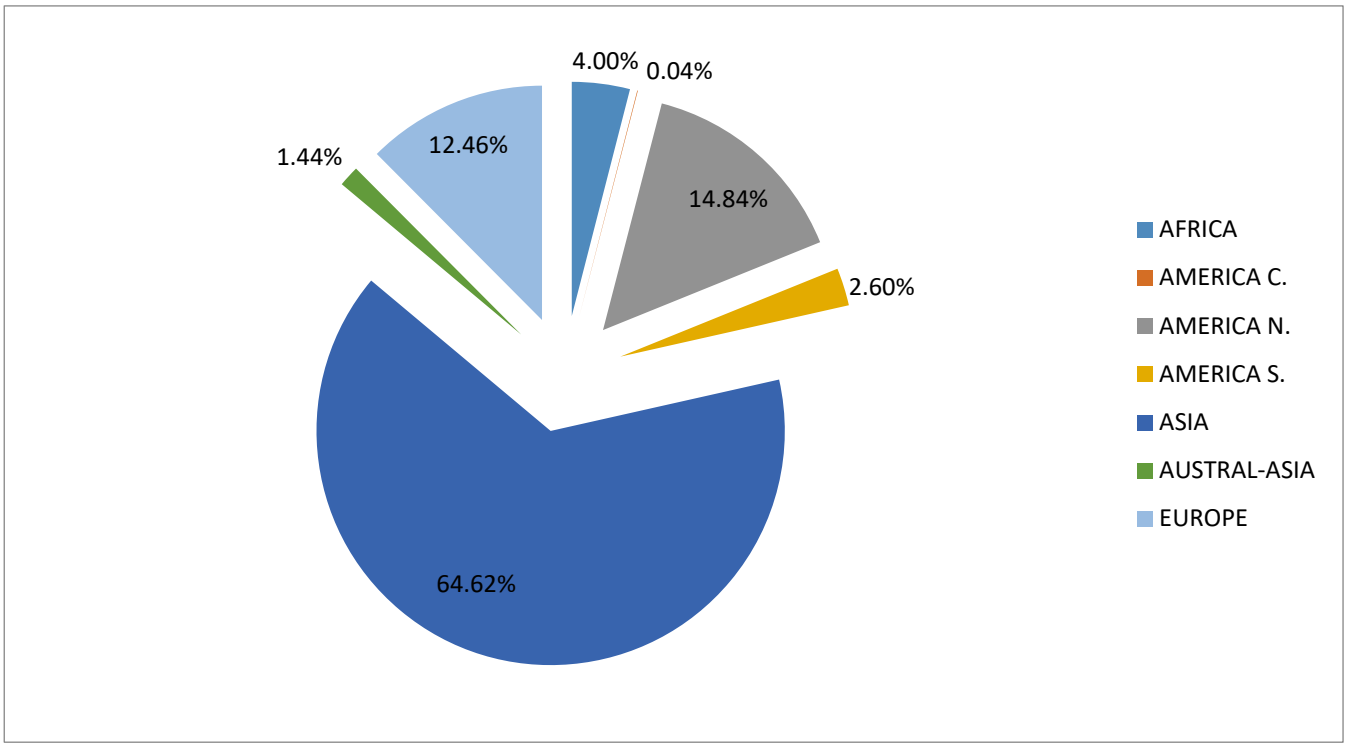


Figura 19 - Percentuale di grandi dighe per continente

A partire dalla rappresentazione grafica, risulta subito evidente come quasi i due terzi delle grandi dighe a livello mondiale risiedano in Asia (Figura 19). Tale dato sembra stupire nel momento in cui si verificare che l'estensione percentuale di questo continente non supera il 30 % (da ciò consegue che la densità di grandi dighe è più che doppia rispetto alla media del pianeta); se invece si considera che l'Asia ospita circa il 60% della popolazione mondiale, la situazione appare più comprensibile in quanto il fabbisogno idrico e energetico può essere correlato al numero di abitanti[29]. Da non trascurare inoltre la presenza di dislivelli notevoli (le catene montuose più elevate sono asiatiche) e ghiacciai diffusi. Il dato di America Settentrionale ed Europa riguarda invece la tradizione di lunga data del mondo occidentale nella costruzione di dighe. Il 4% dell'Africa risulta piuttosto inferiore sia alla popolazione che all'estensione, per via del sottosviluppo; le grandi dighe si concentrano principalmente in corrispondenza dei grandi corsi d'acqua e dei laghi tipici della parte centrale del continente[30]. La percentuale molto contenuta dell'America Latina deriva

[29]https://www.geolounge.com/continents-population-density/
[30] Skinner, Niasse, e Haas, «Sharing the Benefits of Large Dams in West Africa».

dall'ambiente ostile dal punto di vista geomorfologico, mentre il dato dell'America Centrale sembra in linea con l'esiguità dello sviluppo territoriale. Infine, le necessità di ottimizzazione nella gestione idrica dell'Oceania comporta una densità di grandi dighe molto superiore a quella attesa (Tabella 1)[31].

Continente	Numero grandi dighe
AFRICA	2047
AMERICA C.	21
AMERICA N.	7588
AMERICA S.	1330
ASIA	33053
AUSTRAL-ASIA	736
EUROPE	6374
Totale	**51149**

Tabella 1 - Numero di grandi dighe per Continente

3.1.3 Distribuzione per Stato

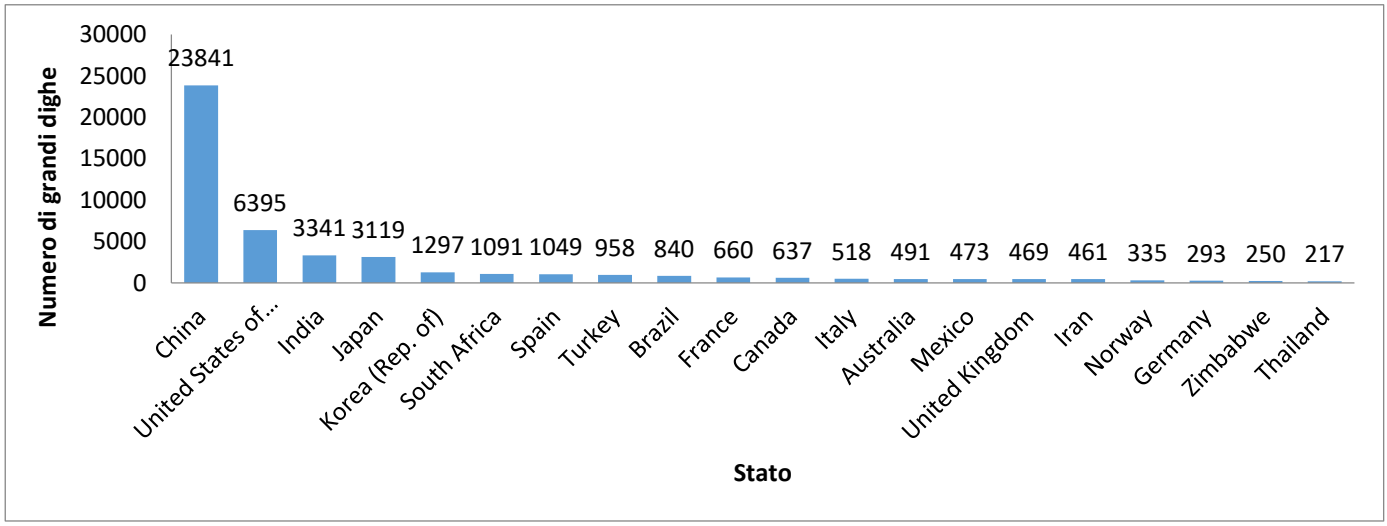


Figura 20 - Numero di grandi dighe per i primi 20 Stati

La Cina, a partire dal secondo dopoguerra, si è distinta per il fortissimo impulso dato allo sfruttamento dell'Energia Idroelettrica, facendo affidamento sulle immense risorse idriche su cui può contare il paese [32]; anche a causa di ciò si spiega l'elevatissimo numero di dighe sul territorio (Figura 20). Inoltre, la popolazione sempre crescente richiede un'accurata gestione del patrimonio idrico nazionale, peraltro fortemente frammentato tra le varie regioni. Per quanto riguarda il dato degli Stati Uniti, è noto come questo paese abbia intrapreso una politica di costruzione di grandi dighe già nella seconda metà del XIX secolo, in modo da creare un sistema coordinato per l'approvvigionamento idrico e energetico di tutti gli Stati dell'Unione.[33] L'elevata densità di dighe sul territorio indiano si spiega con l'esigenza di fornire acqua e elettricità ad un Paese in forte via di

[31] Australian Water Commission, «Large Dams Fact Sheet»
[32] Kang, «Hydropower Development in China: History and Narratives».
[33] University of Wisconsin «Large Dams - Human and Environmental Benefits and Costs».

sviluppo, che conta più di un miliardo di abitanti e che ha la possibilità di fare riferimento alla Catena Himalaiana (Figura 21), con i suoi dislivelli e la sua disponibilità di acqua di origine glaciale[34].

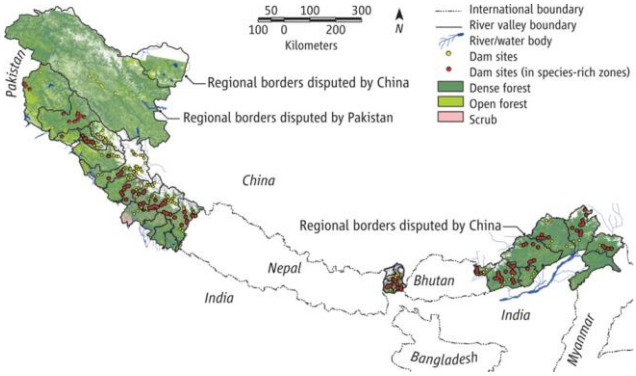


Figura 21 - L'elevata densità di dighe lungo la catena Hymalaiana

Per Giappone, Corea e Thailandia, il numero di grandi dighe si lega all'elevato grado di progresso tecnologico raggiunto (Tabella 2). Gli Stati Europei invece sono sempre stati caratterizzati da una tradizione diffusa nella costruzione dei bacini di grandi dimensioni, progettati costantemente nel corso degli ultimi due secoli.[35] Messico e Australia dipendono infine spesso da ampi invasi per ovviare alla natura desertica del loro territorio.

Stato	Numero grandi dighe	Percentuale grandi dighe sul totale mondiale
China	23841	46.61%
United States of America	6395	12.50%
India	3341	6.53%
Japan	3119	6.10%
Korea (Rep. of)	1297	2.54%
South Africa	1091	2.13%
Spain	1049	2.05%
Turkey	958	1.87%
Brazil	840	1.64%
France	660	1.29%
Canada	637	1.25%
Italy	518	1.01%
Australia	491	0.96%
Mexico	473	0.92%
United Kingdom	469	0.92%
Iran	461	0.90%
Norway	335	0.65%
Germany	293	0.57%
Zimbabwe	250	0.49%
Thailand	217	0.42%

Tabella 2 - Percentuale di grandi dighe per i primi 20 Stati

[34] University of Harvard, «Large Dams in India».
[35] WWF International Dams Initiative «Dams in Europe»

3.1.4 Distribuzione per Tipologia

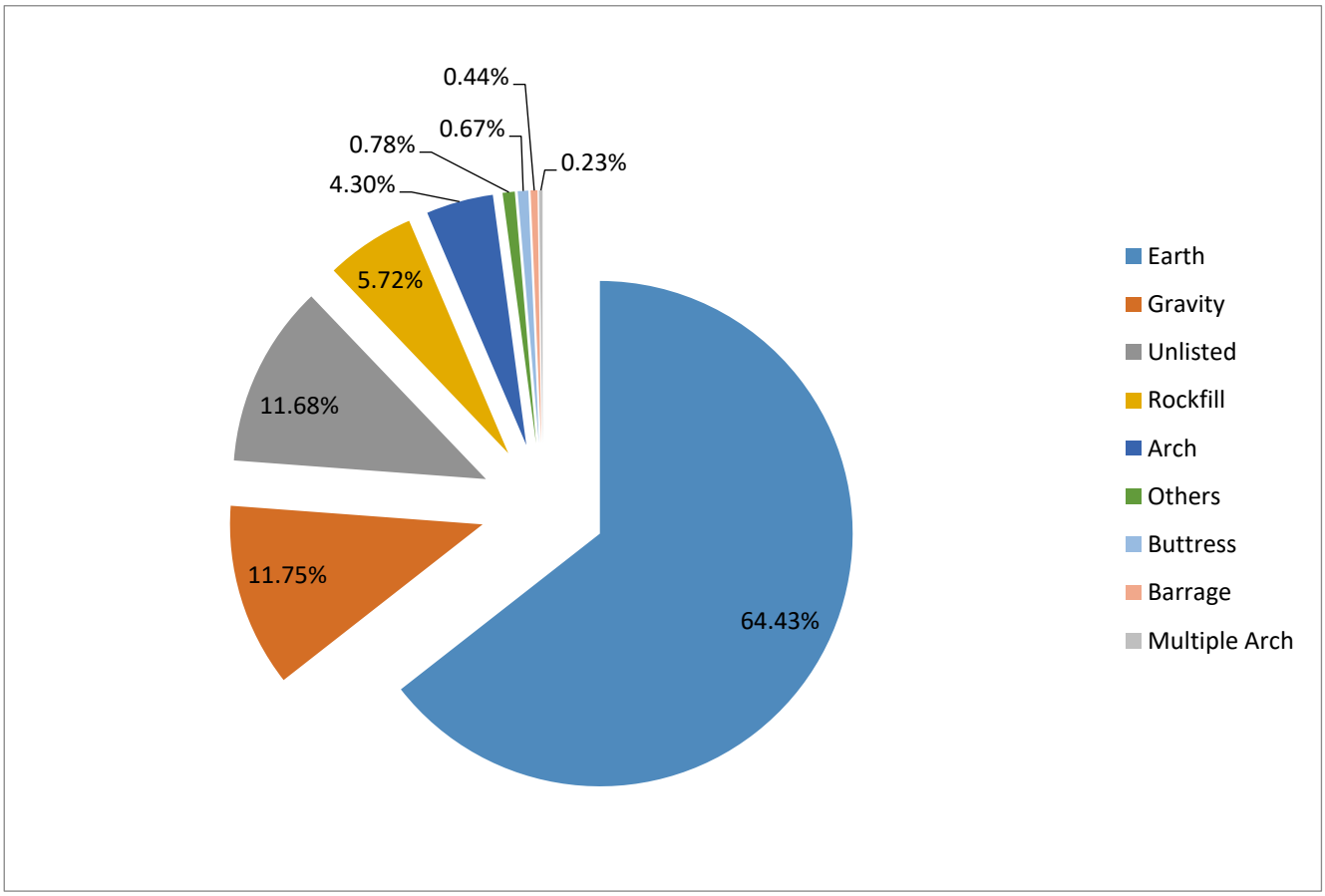


Figura 22 - Percentuale di grandi dighe per tipologia primaria

Anche nell'ambito delle grandi dighe, la tipologia più diffusa resta in terra, arrivando a costituire quasi i due terzi dell'intera popolazione mondiale (Figura 22). Non è un caso se le dighe in terra costituiscano i primi esempi a livello storico di sbarramenti costruiti dall'uomo[36]. La loro semplicità strutturale (Figura 23) le rende efficaci per diverse conformazioni di invaso.

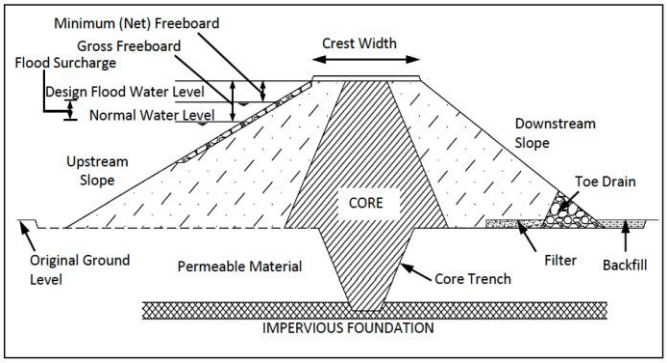


Figura 23 - Sezione tipica di una diga in terra

[36] https://tataandhoward.com/2016/05/a-history-of-dams-from-ancient-times-to-today/

A seguire, le dighe a gravità raggiungono circa il 12% del totale, vista la sicurezza assicurata nei confronti di piene estreme e terremoti, nonché la loro semplicità strutturale[37]. Il dato che riguarda la percentuale di dighe di tipologia non nota (11,68 %) evidenzia la difficoltà, anche per i database più precisi come ICOLD, di ottenere informazioni su determinate opere strutturali, soprattutto nei Paesi che sono frequentemente teatro di attacchi terroristici o che comunque tendono ad essere conservativi sulla comunicazione del proprio patrimonio industriale. La percentuale tutto sommato piuttosto elevata delle dighe di tipo "Rockfill si spiega con la loro economicità, in particolare in ambienti montuosi che presentano una naturale disponibilità di pietrame; inoltre, esse richiedono un'attenzione alla compattazione molto limitato, a fronte tuttavia di un rischio assolutamente non trascurabile di piping e instabilità. Le restanti tipologie strutturali sono tendenzialmente realizzate in Calcestruzzo armato, ma si differenziano in base al design che risponde a particolari esigenze strutturali[38]. Ad esempio, uno sviluppo ad arco della superficie di contenimento permette di ridistribuire meglio gli sforzi convogliandoli sulle spalle della diga; oppure, le dighe "buttress" permettono di risparmiare materiale da costruzione più pregiato tramite la realizzazione di speroni di supporto (Figura 24).

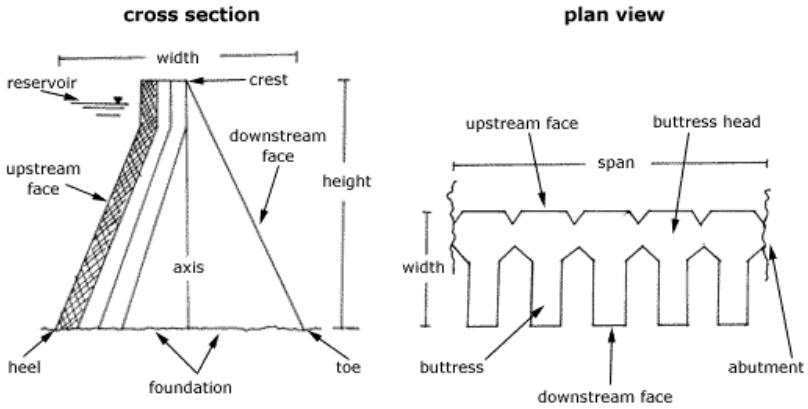


Figura 24 - Schema strutturale di una diga Buttress

Si tratta comunque di tipologie strutturali poco diffuse, in quanto, se si escludono quelle ad arco, la loro presenza cumulata sul totale complessivo rimane inferiore al 2% (Tabella 3).

Tipologia strutturale	Numero di grandi dighe
Earth	32956
Gravity	6008
Unlisted	5976
Rockfill	2926
Arch	2199
Others	397
Buttress	344
Barrage	225
Multiple Arch	118
Totale	**51149**

Tabella 3 - Numero di grandi dighe per tipologia primaria

[37] US Army Corps of Engineers, «Gravity dam design»
[38] «Arch and Buttress Dams»

3.1.5 Distribuzione per Funzione

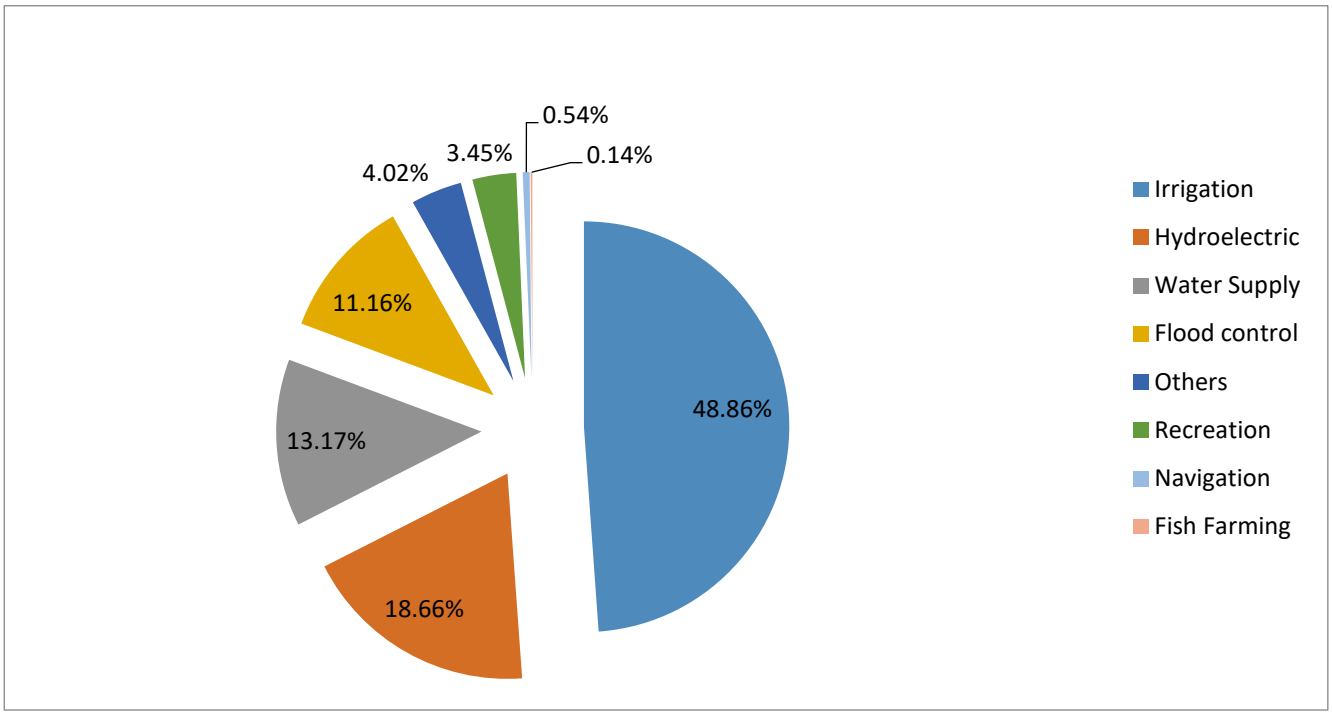


Figura 25 - Percentuale di grandi dighe per Funzione

Quasi la metà delle grandi dighe mondiali è deputata all'approvvigionamento idrico con funzioni di irrigazione (Figura 25). Ciò non deve stupire se si pensa alla diffusione delle grandi dighe in habitat desertici o comunque connotati da una limitata disponibilità di acqua libera, e che al tempo stesso ospitano una popolazione elevata da sostenere. A seguire la funzione di produzione di energia risulta comunque discretamente diffusa, sia per i Paesi in via di sviluppo che per quelli industriali. Analogamente allo sfruttamento agricolo, l'accumulo e la distribuzione di acqua per fini di consumo diretto da parte di privati o industrie rimane una funzione significativamente quotata, soprattutto nell'ottica di distribuire meglio le risorse idriche tra zone ad elevata disponibilità e altre più secche (Tabella 4). Più di una diga su dieci è stata concepita per regimazione delle piene[39]. Le funzioni rimanenti, infine, svolgono funzioni accessorie e non direttamente legate allo sfruttamento idrico, quali ad esempio la navigazione (Figura 26) e la pesca[40].

Figura 26 - La Diga McNary's (Oregon, USA), concepita sia a scopi di navigazione che idroelettrici

[39] ICID, «Role of Dams for Irrigation, Drainage and Flood Control».
[40] Rolfe, Prayaga, «Estimating Values for Recreational Fishing at Freshwater Dams»

Funzione	Numero di grandi dighe
Irrigation	15406
Hydroelectric	5885
Water Supply	4152
Flood control	3518
Others	1269
Recreation	1088
Navigation	171
Fish Farming	44
Totale	**31533**

Tabella 4 - Numero di grandi dighe per Funzione

3.1.6 Distribuzione per Altezza

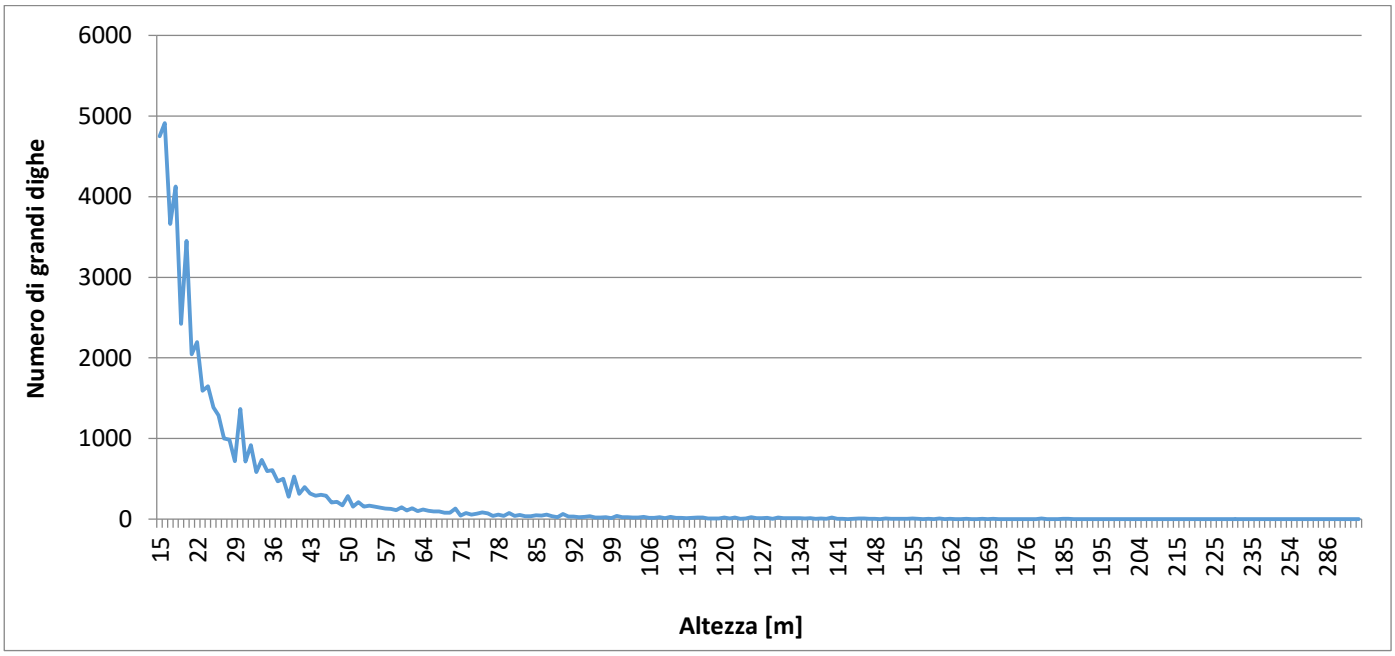


Figura 27 - Distribuzione delle grandi dighe secondo l'Altezza

La distribuzione dell'altezza delle grandi dighe evidenzia come il numero sia fortemente decrescente con l'aumentare dell'altezza (Figura 27). Al netto di deviazioni statistiche sui dati, comunque contenute e associabili anche a approssimazione di registrazione, il picco si installa proprio sulla soglia che costituisce lo spartiacque con le piccole dighe, ovvero i 15 metri[41]. A partire da tale limite, la diminuzione sembra apparentabile ad un'iperbole a concavità pronunciata: per ogni valore superiore ai 30 metri, le dighe che presentano la corrispettiva altezza sono meno di 1000, e tendono a ridursi rapidamente per arrivare a poche decine già intorno ai 100 metri, con un massimo in corrispondenza della diga di Nurek (Figura 28). Tale fenomeno è spiegabile secondo più punti di vista[42]:

- Se le dighe maggiori richiedono conoscenze tecniche di rilievo e non alla portata di tutti i Paesi, quelle più piccole possono invece essere realizzate anche in aree dallo sviluppo tecnologico più arretrato

[41] Degoutte et al., «Petits barrages recommandations pour la conception» (2002).
[42] «Biswas - 2012 - Impacts of Large Dams Issues, Opportunities and C.pdf».

- I costi tendono a lievitare notevolmente con l'aumentare dell'altezza
- Spesso non vi è la necessità di ospitare quantità d'acqua così elevate da giustificare dighe alte centinaia di metri (per quanto non esista un rapporto di proporzionalità diretta, l'altezza resta correlata alla capacità di invaso)
- L'assetto geomorfologico dell'area di progetto deve consentire lo sviluppo verticale dell'opera.

Figura 28 - La Nurek Dam (Tajikistan), con i suoi 300 metri, è il più alto invaso mai costruito

Al fine di migliorare la qualità di visualizzazione di questo tipo di dati, che risulta di difficile lettura per le altezze superiori, si è prevista una suddivisione in classi di altezza secondo i seguenti criteri (d'ora in poi adottati in ogni altra occasione in cui verranno analizzate le altezze, Tabella 5):

	H Min [m]	H Max [m]
Classe 1	15	20
Classe 2	20	25
Classe 3	25	30
Classe 4	30	40
Classe 5	40	50
Classe 6	50	75
Classe 7	75	100
Classe 8	100	150
Classe 9	150	200
Classe 10	200	350

Tabella 5 - Suddivisione in classi per Altezza

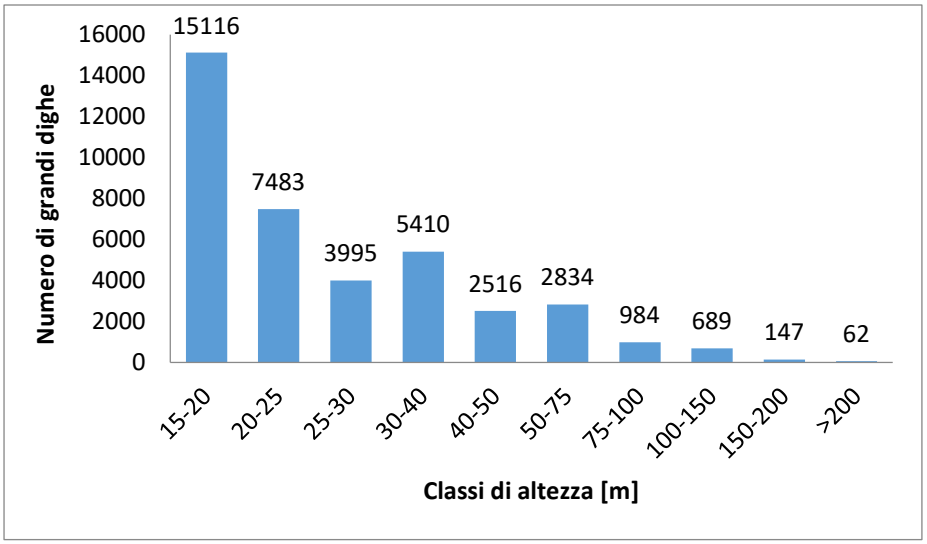


Figura 29 - Numero di grandi dighe per classi di Altezza

La suddivisione in classi conferma naturalmente il trend negativo sulla base dell'altezza (Figura 29), ma riesce a fotografare anche molto bene come il numero di dighe appartenenti alla seconda classe sia inferiore al 50% di quelle della prima, malgrado l'identico range: sintomo di come siano assolutamente privilegiati gli invasi intorno ai 15 metri rispetto a tutti gli altri[43].

3.1.7 Distribuzione per Volume di Invaso

La tipologia di dati associati all'ampiezza di invaso si presta difficilmente ad una visualizzazione dell'andamento del numero di campioni per diversi valori di capacità [mc]; questo perché, al contrario delle altezze che si presentano ben scandite e con pochi valori non rappresentati all'interno del range 15-350 metri, i volumi di bacino tendono ad assumere valori molto elevati e conseguente notevole dispersione statistica. Di conseguenza, si è optato per raffigurare unicamente un istogramma di suddivisioni tra le classi di volume così definite (Tabella 6):

	V Min [10^3 mc]	V Max [10^3 mc]
Classe 1	0	10
Classe 2	10	100
Classe 3	100	1000
Classe 4	1000	10000
Classe 5	10000	100000
Classe 6	100000	1000000
Classe 7	1000000	10000000
Classe 8	10000000	100000000
Classe 9	100000000	1000000000
Classe 10	1000000000	10000000000

Tabella 6 - Suddivisione in classi per Volume di Bacino

[43] Government of Canada, «Positive Effects of Small Dams and Reservoirs»

Una volta imposta tale classificazione al database in esame, si ottiene una distribuzione che evidenzia un picco in corrispondenza della fascia dei 1000 10^3 metri cubi (Figura 30):

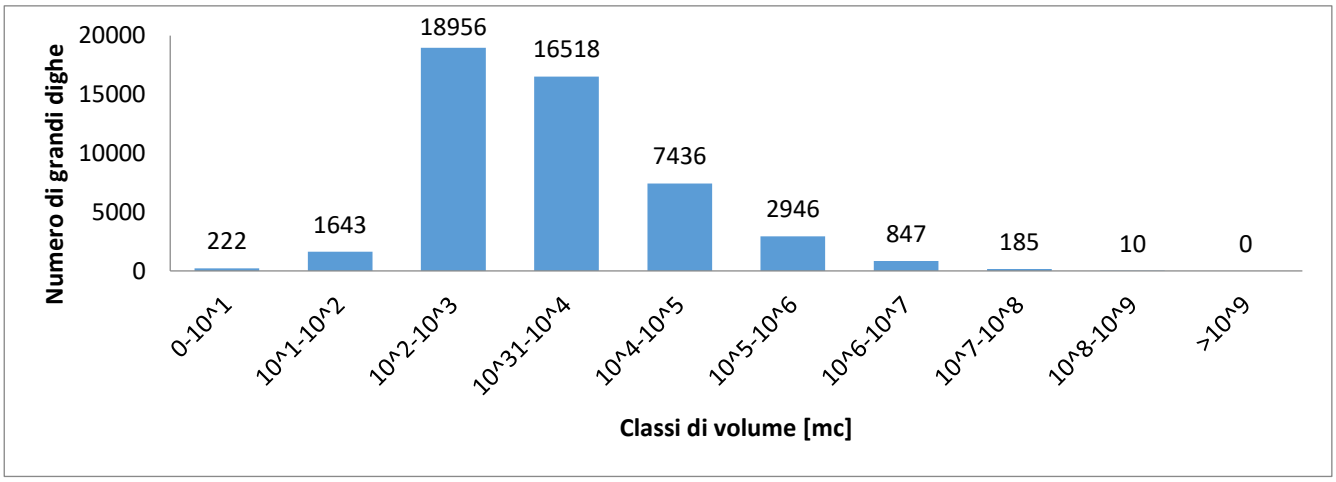


Figura 30 - Numero di grandi dighe per classi di Volume di Bacino

E' opportuno ritenere la maggior parte degli invasi che ricadono nella prima classe come anomalie statistiche, in quanta, data un'altezza minima di 15 metri, sarebbe necessario avere un'area di bacino inferiore ad un metro quadro per mantenere il volume al di sotto dei 10 metri cubi. La classe 3 e la classe 4 presentano numeri compatibili tra loro, cosa che estende il range di capacità più rappresentato tra i 100 e i 10000 metri cubi[44]. Non risultano pervenuti invasi di dimensioni superiori a 10^9 * 10^3 metri cubi (il maggiore è considerata la Kariba Dam, con 1,5*10^11 mc di capienza, Figura 31).

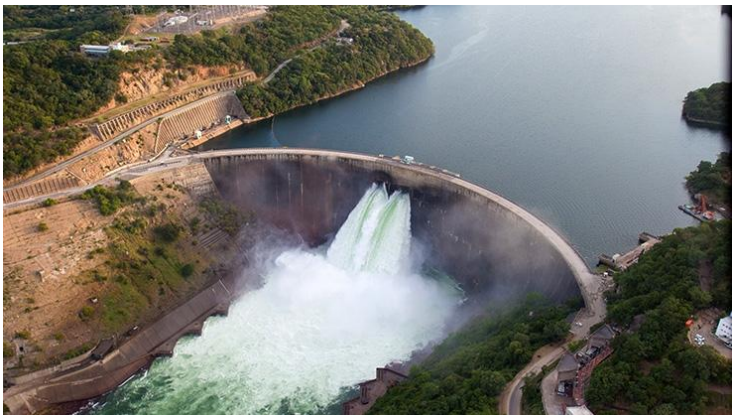


Figura 31 - Con un bacino di 150 km^3, la Kariba Dam è tra le maggiori dighe mondiali per capacità di invaso

[44] Aurada e Rödel, «2.6 Dams – structures and functions – on a global .pdf».

3.1.8 Distribuzione per Anno di Costruzione

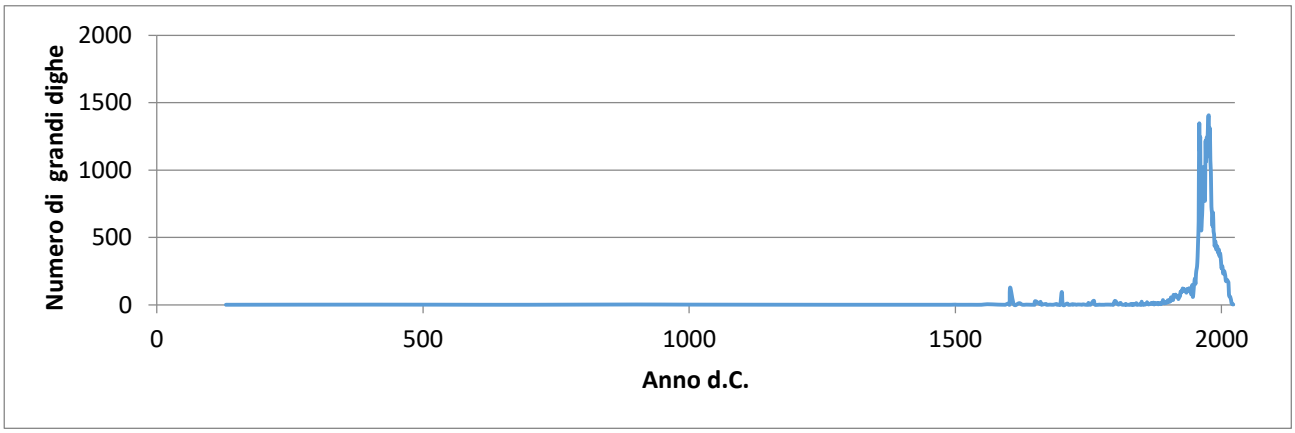


Figura 32 - Distribuzione temporale delle grandi dighe

Vista l'elevata dispersione di dati e l'esistenza di pochissime voci che risalgono al Medioevo, il grafico complessivo appare interpretabile a fatica (Figura 32). Nell'ottica di concentrarsi su un periodo di maggiore interesse e di più chiara lettura, si è scelto di rappresentare unicamente le dighe costruite a partire dal 1850[45]:

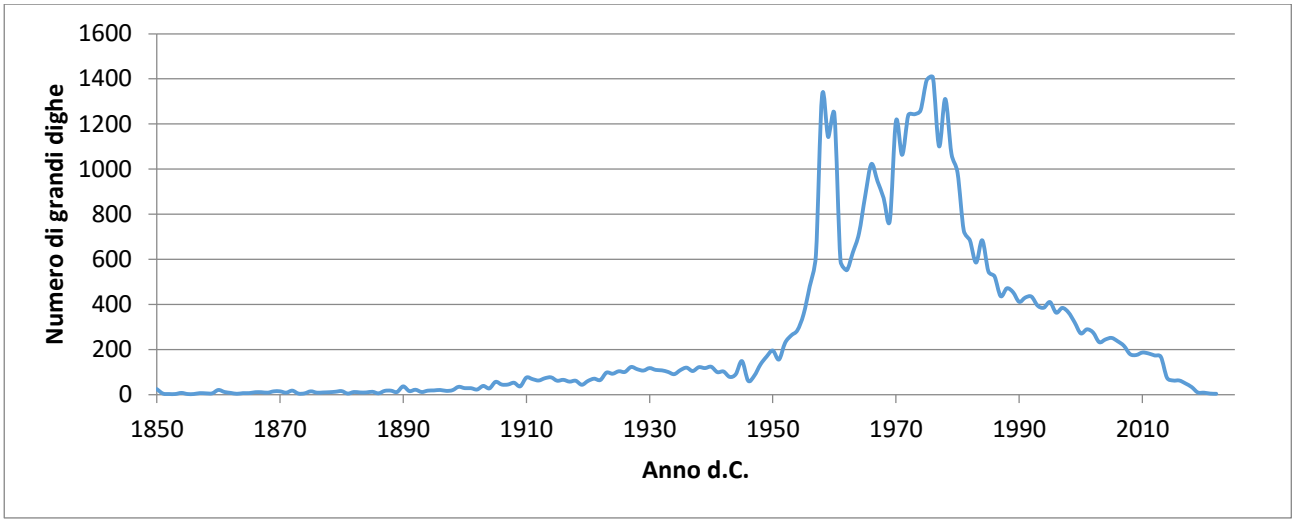


Figura 33 - Distribuzione delle grandi dighe dal 1850

Sulla base di questa visualizzazione (Figura 33), si intuisce immediatamente come il primo impulso alla progettazione di grandi dighe sia da collocarsi tra la fine del XIX secolo e l'inizio del XX secolo, anche se il vero boom prende piede subito dopo la Seconda Guerra Mondiale e porta a circa 40 anni di diffusa edificazione di grandi dighe nel mondo. Tuttavia, già a partire dagli anni Ottanta, il tasso di costruzione di nuove opere inizia a calare in maniera dapprima vertiginosa e poi con un andamento più costante ma pur sempre in diminuzione. Tale fenomeno si può interpretare alla luce del soddisfacimento generalizzato delle esigenze della popolazione già avvenuto nel corso del periodo precedente, arrivando verso la fine del secolo ad un relativo equilibrio tra domanda e

[45] https://tataandhoward.com/2016/05/a-history-of-dams-from-ancient-times-to-today/

offerta. Una volta venuta meno la necessità di realizzare grandi opere di invaso, il focus si è spostato piuttosto sull'ottimizzazione e sulla messa a norma (Figura 34) dei bacini esistenti[46].

Figura 34 - Ristrutturazione della Diga di Pian Sapeio (Genova, Italia)

Ad integrazione dei grafici sopra illustrati, si è provveduto ad operare come di consueto, per questo tipo di variabile, una suddivisione in classi sulla base di periodi temporali ritenuti omogenei. La classificazione seguita è la seguente (Tabella 7):

	Anno Inizio	Anno Fine
Classe 1	0	1700
Classe 2	1700	1800
Classe 3	1800	1850
Classe 4	1850	1900
Classe 5	1900	1925
Classe 6	1925	1950
Classe 7	1950	1960
Classe 8	1960	1970
Classe 9	1970	1980
Classe 10	1980	1990
Classe 11	1990	2000
Classe 12	2000	2010
Classe 13	2010	2020

Tabella 7 - Suddivisione in Classi di Periodi Temporali

[46] United States Society on Dams e United States, «Modernization and optimization of existing dams an» (2007).

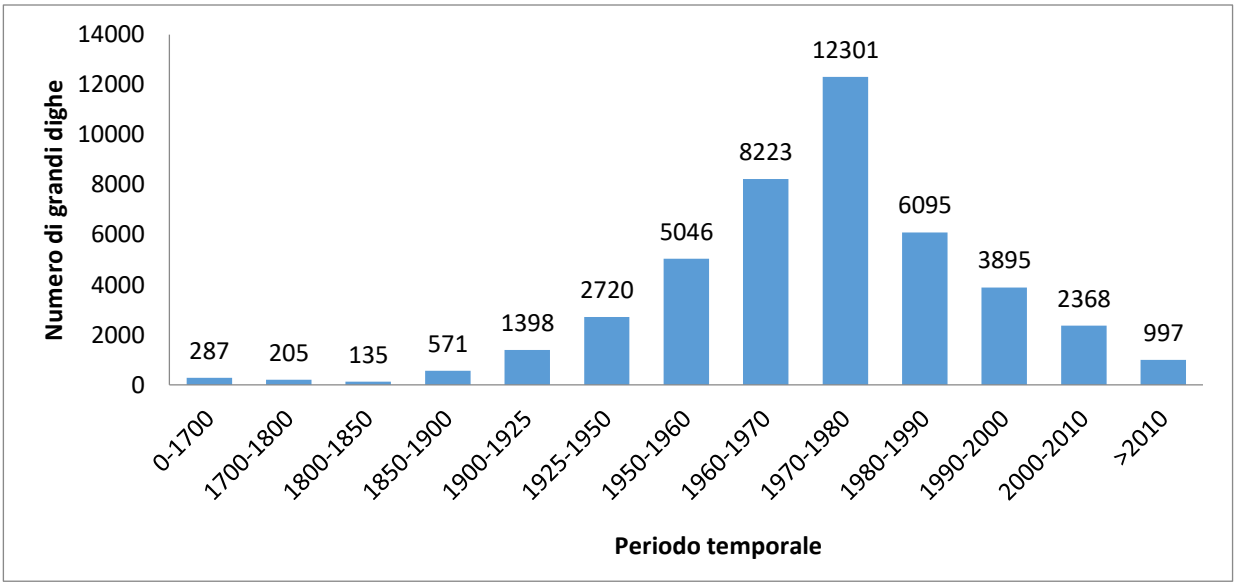


Figura 35 - Numero di grandi dighe per Periodo Temporale

La rappresentazione tramite istogramma conferma il periodo 1970-1980 come più denso di nuove costruzioni di grandi dighe (Figura 35), sottolineando analogamente la crescita esponenziale del secondo dopoguerra e la decrescita progressiva tra la fine del XX secolo e l'inizio del nuovo millennio[47]. E' inoltre interessante notare come la Rivoluzione Industriale, tradizionalmente situata dagli storici a cavallo di Settecento e Ottocento, non influisca immediatamente sulla diffusione delle grandi opere in ambito idraulico; il primo periodo di crescita significativa delle costruzioni di tale genere è la seconda metà del XIX secolo, complice la crescente richiesta di energia in seguito alla scoperta della corrente elettrica (inaugurando quindi l'era degli invasi concepiti a scopo idroelettrico, in precedenza non sfruttabili, Figura 36)[48].

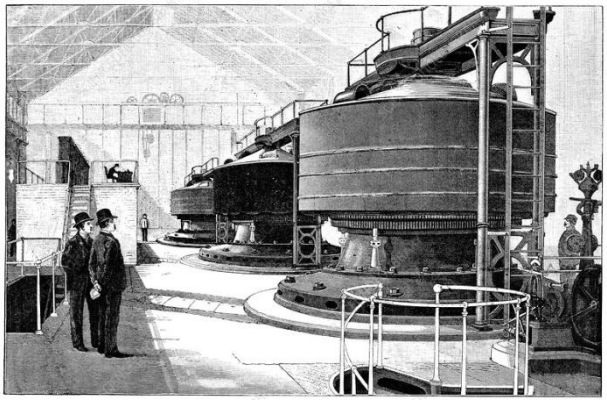
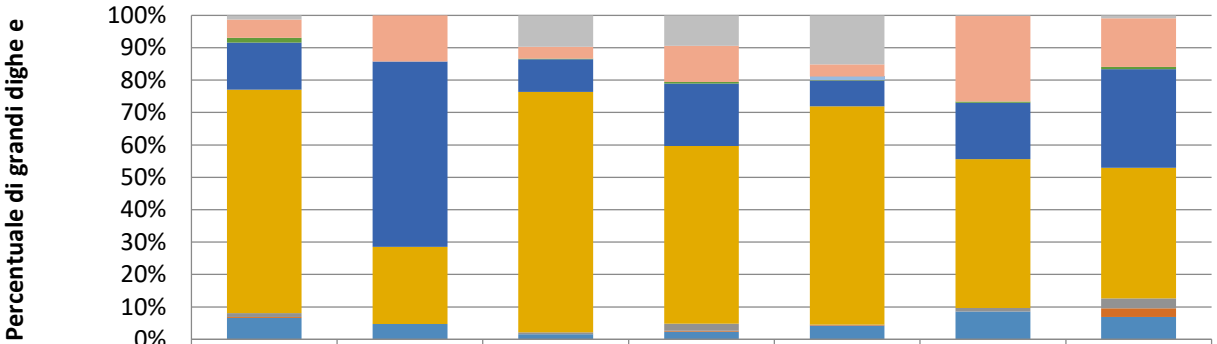


Figura 36 - Generatori elettrici della Diga Niagara Falls (New York, USA), 1895

[47] N van de Giesen, «A brief history of 20th century dam construction and a look into the future»
[48] Shortridge, «Early History of Hydroelectric Power».

3.1.9 Correlazione Continente-Tipologia



	AFRICA	AMERICA C.	AMERICA N.	AMERICA S.	ASIA	AUSTRAL-ASIA	EUROPE
Unlisted	1.37%	0.00%	9.69%	9.40%	15.20%	0.27%	0.96%
Rockfill	5.57%	14.29%	3.69%	11.20%	3.72%	26.36%	15.03%
Others	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.20%	0.00%	0.00%
Multiple Arch	1.47%	0.00%	0.24%	0.45%	0.05%	0.41%	0.69%
Gravity	14.61%	57.14%	10.06%	19.25%	7.90%	17.39%	30.42%
Earth	68.93%	23.81%	74.21%	54.89%	67.38%	45.92%	40.30%
Buttress	1.12%	0.00%	0.57%	2.18%	0.14%	1.09%	3.06%
Barrage	0.29%	0.00%	0.00%	0.23%	0.15%	0.00%	2.60%
Arch	6.64%	4.76%	1.56%	2.41%	4.26%	8.56%	6.93%

Figura 37 - Correlazione Continente-Tipologia per le grandi dighe

La percentuale di dighe in terra resta preponderante in ogni continente (ad eccezione dell'America Centrale, che però, a causa del numero molto limitato di voci, non costituisce un campione statistico affidabile), sebbene in Europa e Oceania si installi al di sotto del 50% (contro il 64,4% di media mondiale); in entrambi i casi, ciò si spiega con il ricorso più diffuso a calcestruzzo (prevalentemente a gravità) e roccia per la realizzazione delle grandi dighe, per ragioni tecnologiche e di disponibilità di materiale in loco (Figura 37)[49]. Singolare è comunque la percentuale di dighe in terra dell'America Settentrionale, superiore perfino a quella del continente africano, malgrado il notevole divario di sviluppo tecnologico[50]. Le tipologie "Buttress" e "Barrage" (rispettivamente indicanti una diga a speroni e uno sbarramento) appaiono generalmente rare, ad eccezione dell'Europa che complessivamente trova in loro il 5% della sua popolazione complessiva di grandi dighe. L'Oceania accoglie una percentuale di dighe ad arco praticamente doppia della media mondiale (Figura 38); ancora una volta, potrebbe trattarsi di una deviazione statistica indotta dal numero contenuto di record rispetto agli altri continenti.

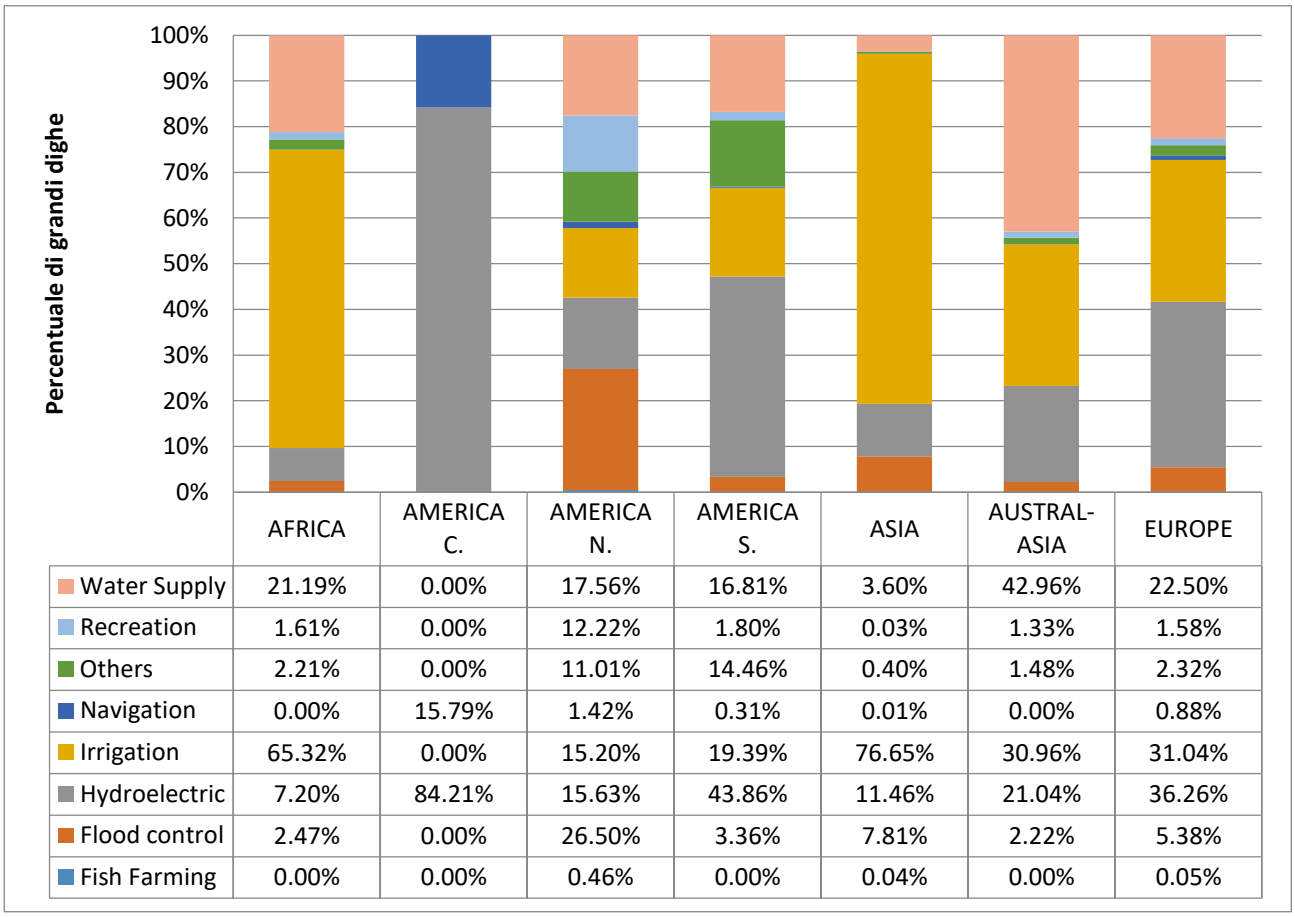
[49] Türkmen et al., «Effect of Construction Material on Dam Type Select» (2013).
[50] Edward A. Ackerman, George O.G. Loff, «Technology in American Water Development»

Figura 38 - Diga ad arco in Tasmania, Australia

Infine, un dato piuttosto discordante su base continentale è rappresentato dalle opere di tipologia ignota. Questo parametro si mantiene prossimo allo zero per Africa, America Centrale, Africa, Oceania e Europa, sfiora il 10% in America del Nord e del Sud e supera il 15% in Asia: la spiegazione più immediata dovrebbe coinvolgere motivazioni di sicurezza e segretezza industriale (potenze industriali come USA, Cina e Brasile, per citare un esempio per ogni continente, potrebbero avere l'interesse a limitare la comunicazione di dati su alcuni impianti particolarmente strategici)[51].

[51] https://www.kxan.com/news/local/austin/safety-of-central-texas-dams-kept-a-secret_20180227104339113/994706070

3.1.10 Correlazione Continente-Funzione



	AFRICA	AMERICA C.	AMERICA N.	AMERICA S.	ASIA	AUSTRAL-ASIA	EUROPE
Water Supply	21.19%	0.00%	17.56%	16.81%	3.60%	42.96%	22.50%
Recreation	1.61%	0.00%	12.22%	1.80%	0.03%	1.33%	1.58%
Others	2.21%	0.00%	11.01%	14.46%	0.40%	1.48%	2.32%
Navigation	0.00%	15.79%	1.42%	0.31%	0.01%	0.00%	0.88%
Irrigation	65.32%	0.00%	15.20%	19.39%	76.65%	30.96%	31.04%
Hydroelectric	7.20%	84.21%	15.63%	43.86%	11.46%	21.04%	36.26%
Flood control	2.47%	0.00%	26.50%	3.36%	7.81%	2.22%	5.38%
Fish Farming	0.00%	0.00%	0.46%	0.00%	0.04%	0.00%	0.05%

Figura 39 - Correlazione Continente-Funzione per le grandi dighe

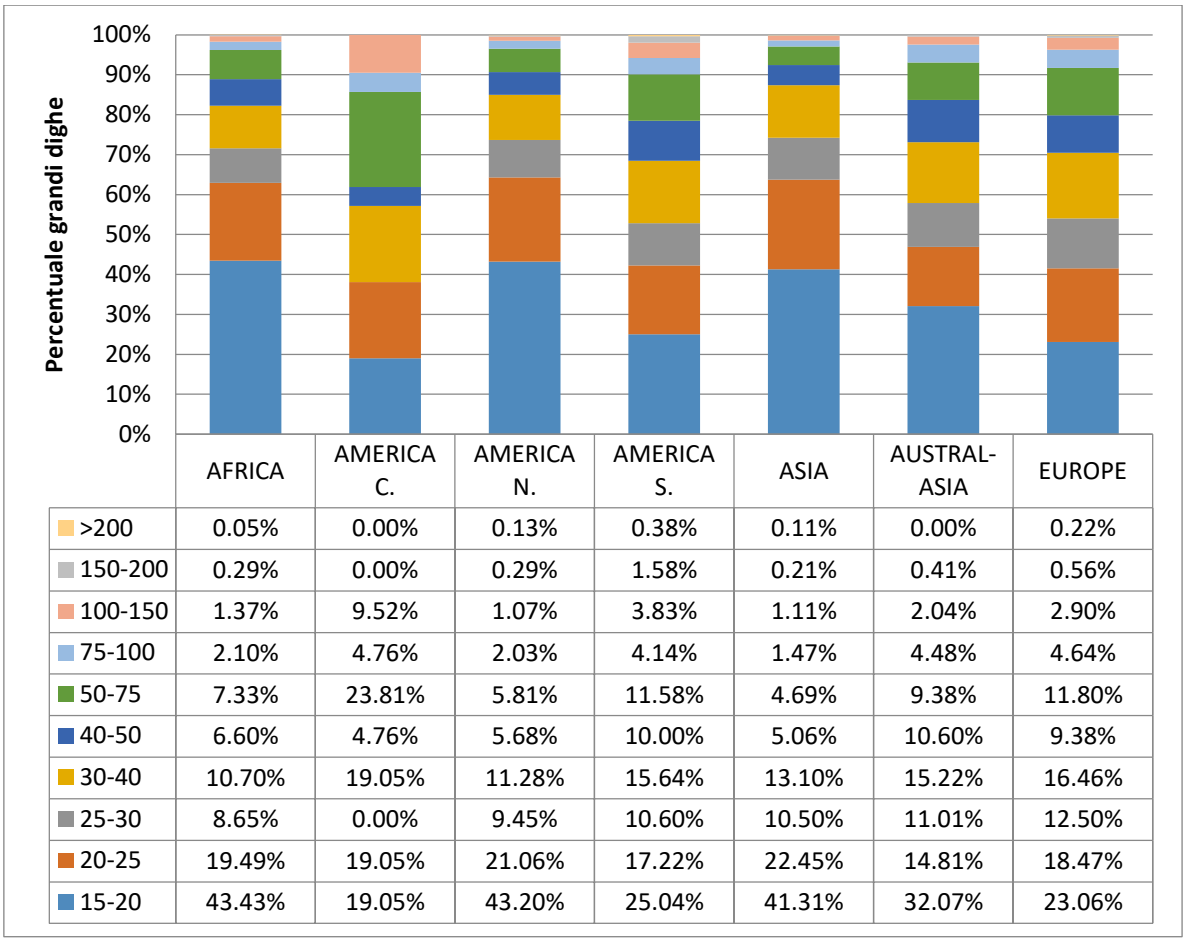
L'America del Nord si caratterizza per una distribuzione decisamente omogenea delle funzioni legate alle grandi dighe; discorso analogo per l'Europa, la quale però tende a trascurare gli scopi accessori come la pesca e quelli di salvaguardia dalle piene (Figura 39). In Africa, come prevedibile, la quasi totalità delle grandi dighe è deputata alla gestione delle scarse risorse idriche, sia in vista di una distribuzione ai centri abitati, sia a fini agricoli; vista la similarità di habitat, anche l'Oceania presenta una suddivisione simile, pur se con un maggiore sviluppo dell'idroelettrico. I dati sull'Asia tradiscono la sua secolare vocazione agricola (Figura 40), visto che più dei tre quarti delle opere idrauliche sono dedicate unicamente all'irrigazione[52].

[52] Penning de Vries e International Water Management Institute, «Integrated land and water management for food and irrigation» (2004).

Figura 40 - Uno sbarramento del progetto Dujianngyan, per l'irrigazione del sud-ovest della Cina

L'America meridionale ospita il maggior numero di grandi dighe idroelettriche (in proporzione), se si esclude il dato dell'America Centrale che, come già anticipato in precedenza, non appare granché affidabile.

3.1.11 Correlazione Continente-Altezza

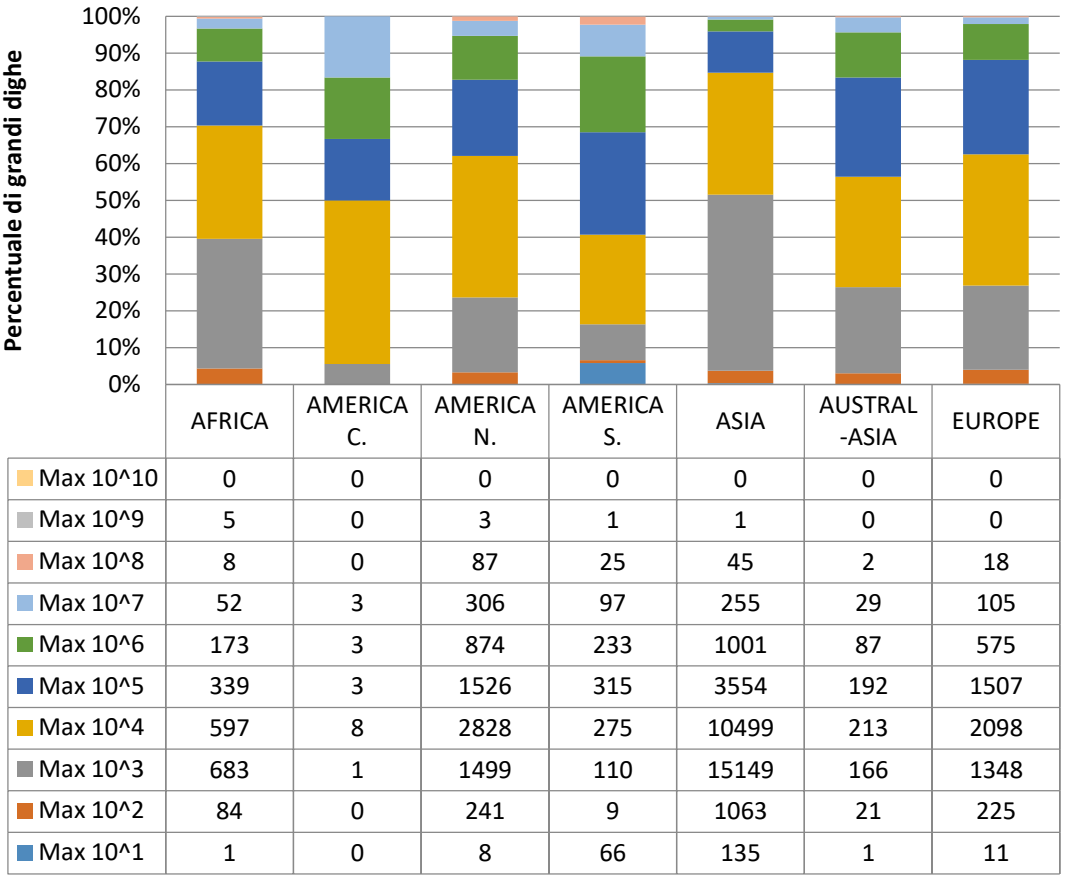


	AFRICA	AMERICA C.	AMERICA N.	AMERICA S.	ASIA	AUSTRAL-ASIA	EUROPE
>200	0.05%	0.00%	0.13%	0.38%	0.11%	0.00%	0.22%
150-200	0.29%	0.00%	0.29%	1.58%	0.21%	0.41%	0.56%
100-150	1.37%	9.52%	1.07%	3.83%	1.11%	2.04%	2.90%
75-100	2.10%	4.76%	2.03%	4.14%	1.47%	4.48%	4.64%
50-75	7.33%	23.81%	5.81%	11.58%	4.69%	9.38%	11.80%
40-50	6.60%	4.76%	5.68%	10.00%	5.06%	10.60%	9.38%
30-40	10.70%	19.05%	11.28%	15.64%	13.10%	15.22%	16.46%
25-30	8.65%	0.00%	9.45%	10.60%	10.50%	11.01%	12.50%
20-25	19.49%	19.05%	21.06%	17.22%	22.45%	14.81%	18.47%
15-20	43.43%	19.05%	43.20%	25.04%	41.31%	32.07%	23.06%

Figura 41 - Correlazione Continente-Altezza per le grandi dighe

In tutti i continenti si assiste ad una decrescita piuttosto netta della numerosità in relazione all'altezza; tuttavia, da una parte Europa, Oceania e Sudamerica presentano un numero più limitato di dighe nella prima fascia (15-20) e le classi immediatamente superiori appaiono più omogenee (sintomo di un ricorso abbastanza uniforme a bacini di altezza compresa tra i 15 e i 50 metri), mentre per gli altri continenti la predilezione verso le dighe più basse appare pronunciata (Figura 41).

3.1.12 Correlazione Continente-Volume di Invaso



	AFRICA	AMERICA C.	AMERICA N.	AMERICA S.	ASIA	AUSTRAL -ASIA	EUROPE
Max 10^10	0	0	0	0	0	0	0
Max 10^9	5	0	3	1	1	0	0
Max 10^8	8	0	87	25	45	2	18
Max 10^7	52	3	306	97	255	29	105
Max 10^6	173	3	874	233	1001	87	575
Max 10^5	339	3	1526	315	3554	192	1507
Max 10^4	597	8	2828	275	10499	213	2098
Max 10^3	683	1	1499	110	15149	166	1348
Max 10^2	84	0	241	9	1063	21	225
Max 10^1	1	0	8	66	135	1	11

Figura 42 - Correlazione Continente-Volume Invaso per le grandi dighe

La distribuzione del volume di bacino appare più omogenea rispetto a quella dell'altezza; l'unica classe che genera una disparità pronunciata è la terza (che non a caso è quella che presenta l'occorrenza maggiore, Figura 42), molto estesa in Paesi dalla forte vocazione agricola come Asia e Africa. Questo poiché i bacini irrigui richiedono tendenzialmente volumi decisamente inferiori rispetto a quelli previsti per un impianto idroelettrico (Figura 43)[53].

[53] Biswas, «Impacts of Large Dams Issues, Opportunities and Constraints» (2012).

Figura 43 - Una diga a scopo irriguo di altezza contenuta (Namibia, Africa)

3.1.13 Correlazione Continente-Anno di Costruzione

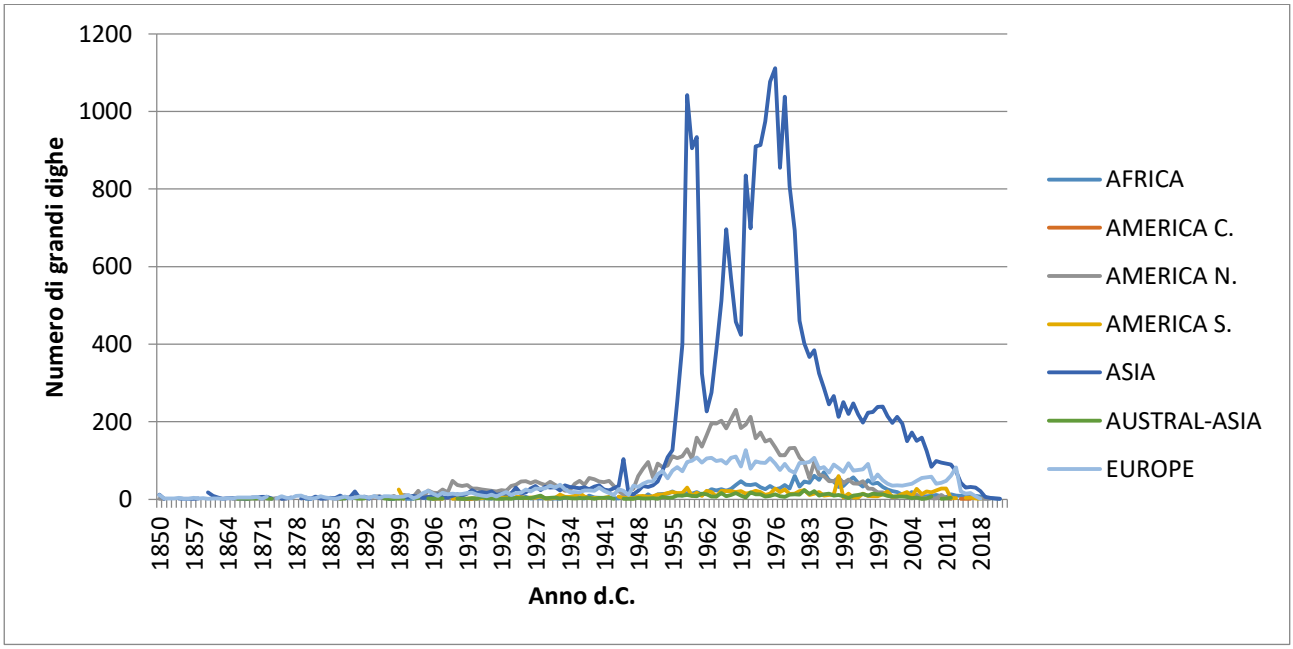


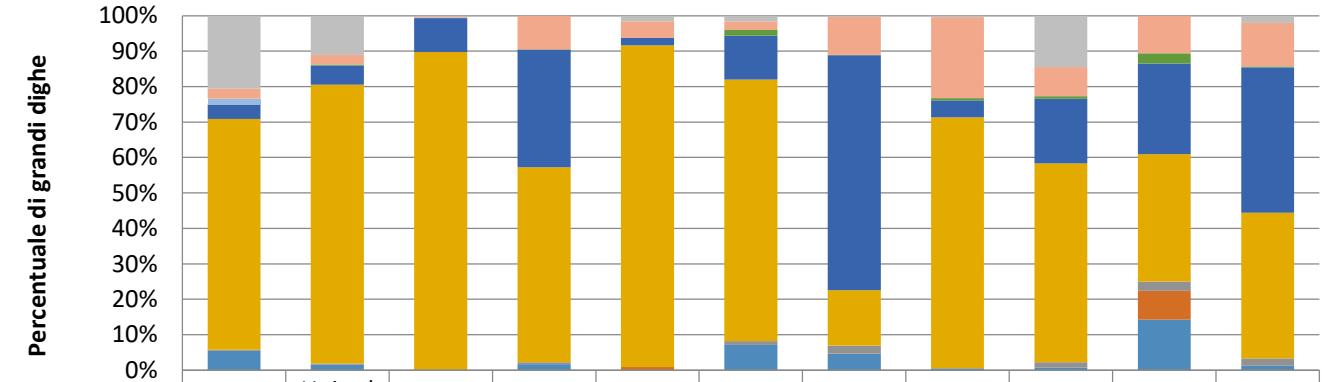
Figura 44 - Correlazione Continente-Anno di Costruzione

Come già fatto in precedenza, si analizza l'andamento unicamente a partire dal 1850, sia per ragioni di resa grafica che per disponibilità di dati (Figura 44). Da una prima analisi si evince come il primo impulso alla costruzione di grandi dighe sia stato impresso da Europa e Nordamerica per ragioni di avanzamento tecnologico (Figura 45), per poi essere superate nettamente dalle potenze asiatiche (Cina, Giappone e India su tutte) che hanno vissuto due picchi, uno durante gli anni '50 e uno sul finire degli anni '70[54]. Negli altri continenti la situazione appare traslata di una ventina d'anni rispetto a quello asiatico, ovviamente con numeri molto più contenuti. Infine, è significativo notare come il calo generalizzato nella progettazione di nuovi invasi interessi l'Europa relativamente meno, almeno fino agli ultimi anni (la media mondiale invece inizia a crollare dalla fine del XX secolo).

[54] Bautista, DeRosa, «Agriculture and the New Industrial Revolution in Asia».

Figura 45 - Il cantiere della Nimrod Dam (USA), concepita negli anni '30 del XX secolo

3.1.14 Correlazione Stato-Tipologia



	China	United States of America	India	Japan	Korea (Rep. of)	South Africa	Spain	Turkey	Brazil	France	Canada
Unlisted	20.57%	11.07%	0.42%	0.00%	1.54%	1.56%	0.29%	0.42%	14.52%	0.00%	2.04%
Rockfill	2.82%	2.71%	0.30%	9.49%	4.70%	2.47%	10.77%	22.86%	8.21%	10.61%	12.24%
Others	1.67%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Multiple Arch	0.06%	0.23%	0.00%	0.06%	0.00%	1.65%	0.10%	0.63%	0.71%	2.88%	0.31%
Gravity	4.04%	5.46%	9.49%	33.25%	2.08%	12.37%	66.25%	4.80%	18.21%	25.61%	40.97%
Earth	65.09%	78.67%	89.70%	54.92%	90.75%	73.69%	15.63%	70.77%	56.07%	35.91%	41.13%
Buttress	0.07%	0.38%	0.00%	0.61%	0.00%	0.82%	2.19%	0.00%	1.55%	2.58%	2.04%
Barrage	0.14%	0.00%	0.06%	0.00%	0.93%	0.09%	0.10%	0.00%	0.00%	8.18%	0.00%
Arch	5.54%	1.49%	0.03%	1.67%	0.00%	7.33%	4.67%	0.52%	0.71%	14.24%	1.26%

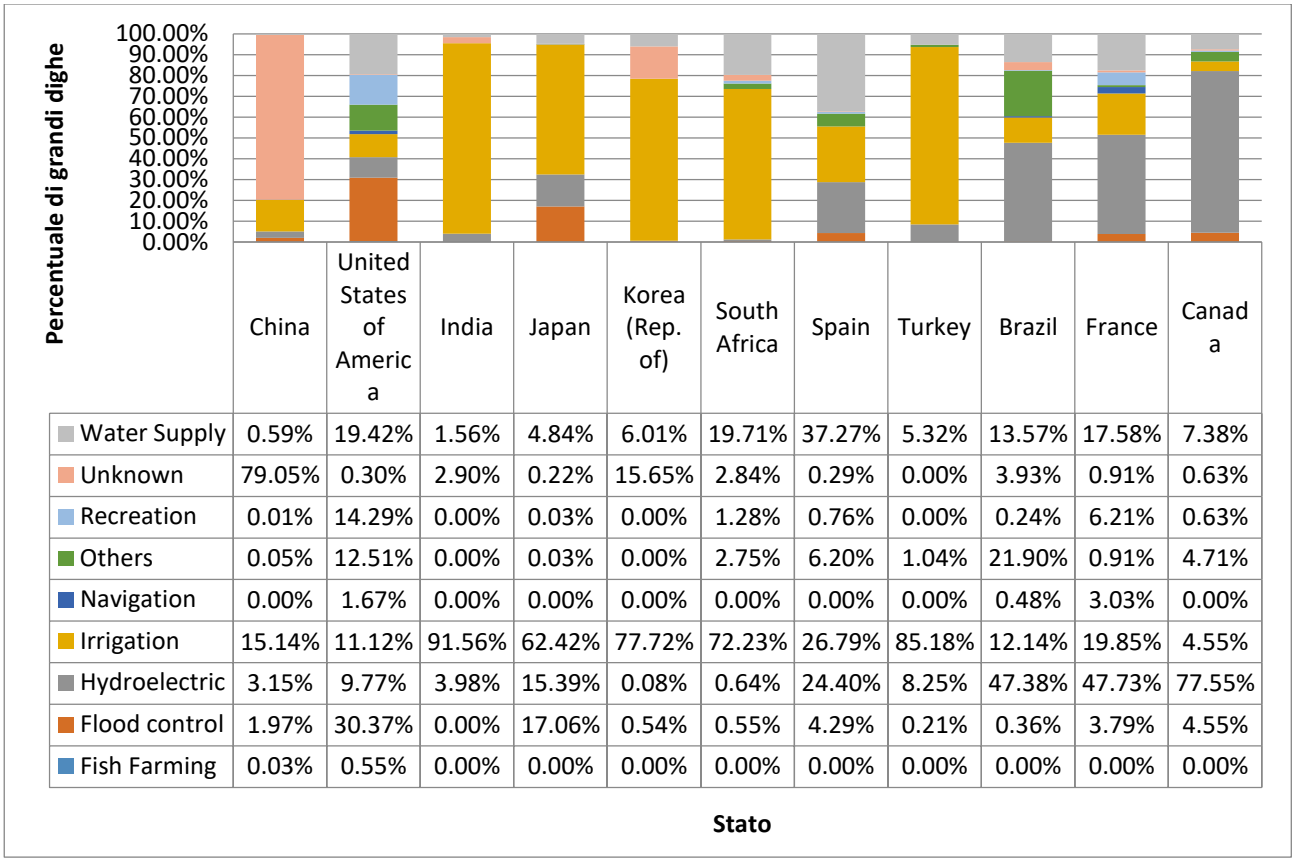
Stato

Figura 46 - Correlazione Stati-Tipologia per le grandi dighe

Nell'ambito dei primi dieci Stati mondiali per numero di grandi dighe, la tipologia in terra rimane diffusamente la più frequente, ad eccezione della Spagna che ne ospita soltanto un 15% a fronte di due terzi della popolazione realizzata in roccia (Figura 46). Questa anomalia si spiega con l'elevata densità su tutto il territorio iberico di cave di roccia di buona qualità, che rendono più conveniente

l'impiego di quest'ultima anche nei campi d'impiego tradizionalmente associati alla terra[55]. Discorso diametralmente opposto per l'India, in cui addirittura 9 dighe su 10 sono edificate in terra e le rimanenti a gravità, lasciando spazio pressoché nullo alle altre tipologie strutturali; si tratta di una conseguenza quasi inevitabile in un Paese in via di sviluppo e dalle forti contraddizioni socio-economiche, che necessita di fonti idriche ed energetiche notevoli per sostenere una popolazione di più di un miliardo di persone, senza tuttavia poter contare su uno sviluppo tecnologico al livello perlomeno di quello dei vicini Cinesi[56]. Se infatti la Cina condivide la smisurata domanda di risorse idriche dell'India, in misura perfino maggiore, ha avviato politiche di industrializzazione e ricerca tecnologica con qualche decennio di anticipo; di conseguenza, le dighe ad arco raggiungono una ragguardevole quota del 5%, di molto superiore alla maggioranza dei Paesi occidentali[57]. Una delle poche eccezioni è rappresentata dalla Francia e dalla sua predisposizione a realizzare dighe ad arco con un'occorrenza di quasi il 15%[58]. Infine, un dato significativo riguarda la densità di invasi dalla tipologia ignota in Paesi come Cina, USA e Brasile: al di là di una normale occorrenza statistica, bisogna tenere in conto le necessità di salvaguardia da attentati e da spionaggio di realtà dall'elevato progresso industriale come quelle sopra citate.

3.1.15 Correlazione Stato-Funzione



	China	United States of America	India	Japan	Korea (Rep. of)	South Africa	Spain	Turkey	Brazil	France	Canada
Water Supply	0.59%	19.42%	1.56%	4.84%	6.01%	19.71%	37.27%	5.32%	13.57%	17.58%	7.38%
Unknown	79.05%	0.30%	2.90%	0.22%	15.65%	2.84%	0.29%	0.00%	3.93%	0.91%	0.63%
Recreation	0.01%	14.29%	0.00%	0.03%	0.00%	1.28%	0.76%	0.00%	0.24%	6.21%	0.63%
Others	0.05%	12.51%	0.00%	0.03%	0.00%	2.75%	6.20%	1.04%	21.90%	0.91%	4.71%
Navigation	0.00%	1.67%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.48%	3.03%	0.00%
Irrigation	15.14%	11.12%	91.56%	62.42%	77.72%	72.23%	26.79%	85.18%	12.14%	19.85%	4.55%
Hydroelectric	3.15%	9.77%	3.98%	15.39%	0.08%	0.64%	24.40%	8.25%	47.38%	47.73%	77.55%
Flood control	1.97%	30.37%	0.00%	17.06%	0.54%	0.55%	4.29%	0.21%	0.36%	3.79%	4.55%
Fish Farming	0.03%	0.55%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Figura 47 - Correlazione Stati-Funzione per le grandi dighe

[55] Perez , « The Mineral Industry of Spain».
[56] «Large Dams in India».
[57] Jinsheng , «Dam Construction in China»
[58] http://www.traianvs.net/textos/archdams_en.htm

Contrariamente alla tipologia strutturale, la suddivisione funzionale delle dighe si distingue per peculiarità notevoli all'interno dei confini di ogni singolo Stato (Figura 47). Ad esempio, quasi l'80% delle grandi dighe cinesi non risultano documentate in termini di scopo, probabilmente per ragioni di segreto di stato[59]. La distribuzione appare invece molto omogenea tra le varie funzioni negli Stati Uniti, a causa della loro natura federale che tende nel complesso ad uniformare le esigenze dei cittadini. L'India, un Paese tradizionalmente votato all'agricoltura e caratterizzato da una popolazione in forte crescita, è costretta a destinare 9 grandi dighe su 10 all'irrigazione; questa situazione estrema si ripete anche in uno Stato invece all'avanguardia come la Korea del Sud, sintomo del fatto che non si tratta di un fenomeno forzatamente connesso alla povertà del territorio[60]. Discorso analogo per la Turchia, la quale conserva comunque una quota di idroelettrico a sostegno dei propri consumi. Il Giappone dedica più del 17% dei propri invasi maggiori al controllo delle piene. La naturale ristrettezza di risorse idriche che caratterizza l'Africa meridionale costringe il Sudafrica a dedicare pressoché l'intera popolazione locale di grandi dighe (più del 90% del totale) all'accumulo di acqua per fini di consumo privato o agricolo. Il grafico di Francia e Spagna fotografa una situazione caratteristica dell'Europa, ovvero un ricordo agli invasi di ampie dimensioni per la produzione di energia da un lato e per la gestione idrica dall'altro, con una distribuzione piuttosto regolare. Infine, Brasile, e in misura ancora maggiore Canada (Figura 48), tendono a sfruttare in maniera pronunciata le proprie risorse idroelettriche, dedicando ad essere, rispettivamente, poco meno del 50 e dell'80% del parco dighe nazionale[61].

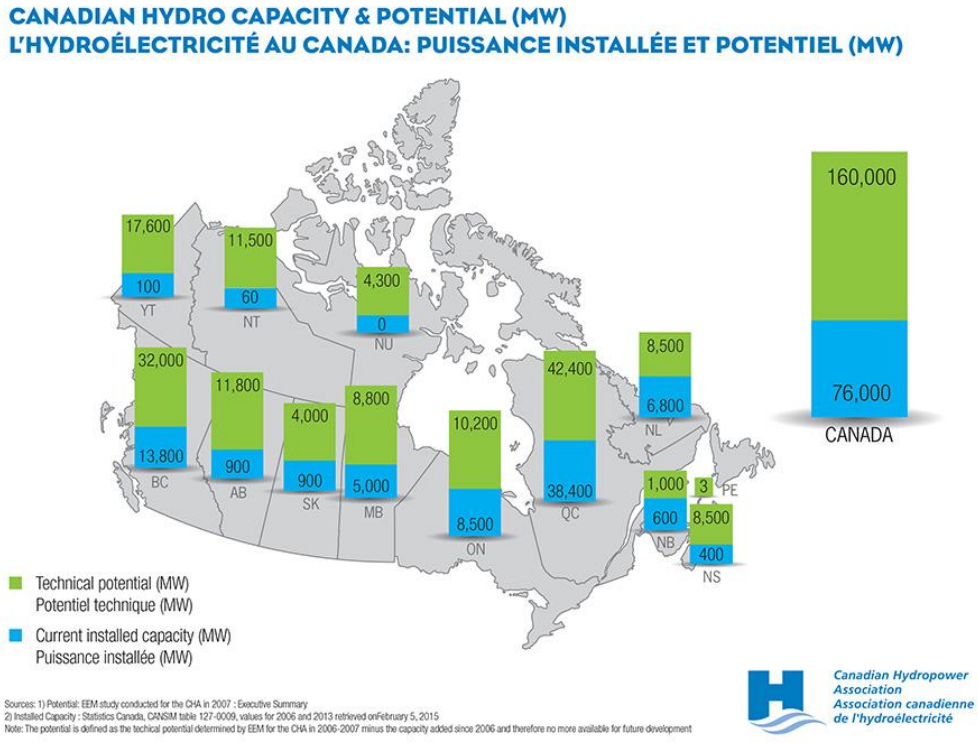
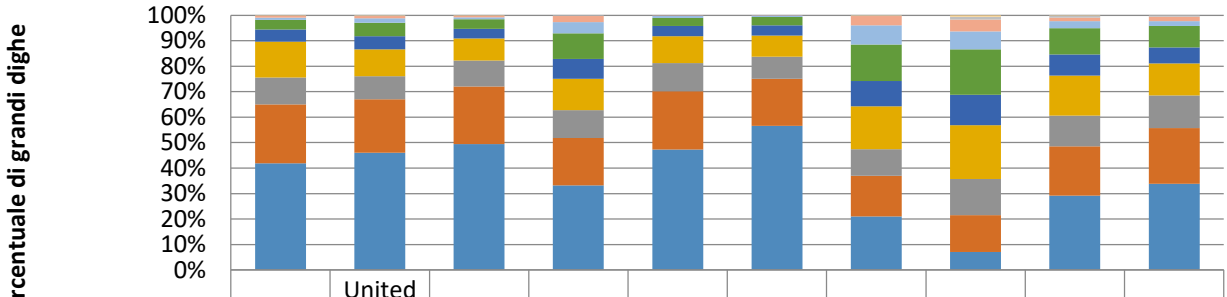


Figura 48 - La distribuzione della potenza idroelettrica in Canada

[59] https://www.independent.co.uk/news/world/asia/the-secret-dam-china-begins-huge-project-in-world-heritage-site-displacing-up-to-100000-people-and-5351298.html
[60] FAO, «Hydric Statitistic on South Korea»
[61] Cywinski «HYDROPOWER AND THE CANADIAN ECONOMY JOBS».

3.1.16 Correlazione Stato-Altezza



	China	United States of America	India	Japan	Korea (Rep. of)	South Africa	Spain	Turkey	Brazil	France
>200 Classe 10	0.08%	0.06%	0.06%	0.00%	0.00%	0.00%	0.10%	0.52%	0.12%	0.00%
150-200 Classe 9	0.16%	0.22%	0.15%	0.35%	0.00%	0.00%	0.19%	1.15%	0.83%	0.61%
100-150 Classe 8	0.68%	0.86%	0.60%	2.40%	0.23%	0.09%	3.72%	4.70%	1.31%	1.67%
75-100 Classe 7	0.89%	1.77%	0.81%	4.30%	0.85%	0.55%	7.53%	6.99%	2.86%	1.97%
50-75 Classe 6	3.84%	5.29%	3.77%	10.07%	3.16%	3.30%	14.30%	17.85%	10.24%	8.33%
40-50 Classe 5	4.77%	5.14%	3.68%	7.86%	4.01%	4.03%	9.91%	12.00%	8.33%	6.36%
30-40 Classe 4	14.05%	10.63%	8.71%	12.28%	10.49%	8.25%	16.87%	21.09%	15.71%	12.58%
25-30 Classe 3	10.47%	9.05%	10.15%	10.97%	11.10%	8.71%	10.39%	14.20%	12.02%	12.73%
20-25 Classe 2	23.23%	21.00%	22.66%	18.53%	22.90%	18.52%	15.92%	14.41%	19.40%	21.97%
15-20 Classe 1	41.84%	45.97%	49.42%	33.25%	47.26%	56.55%	21.07%	7.10%	29.17%	33.79%

Stato

Figura 49 - Correlazione Stati-Altezza per le grandi dighe

I primi sei Paesi per numero di grandi dighe presentano una distribuzione in termini di altezza analoga. In particolare, Cina, USA, India e Corea del Sud, tendono ad ospitare circa il 40% di dighe tra i 15 e i 20 metri, il 20 % tra i 20 e i 25 metri e la quota restante ripartita in massima parte sulle dighe più basse di 40 metri (Figura 49); in particolare, all'interno degli Stati sopracitati meno del 10% della popolazione di grandi dighe supera i 50 metri. Se da un lato questo dato è compatibile con il livello di progresso tecnologico in Cina e soprattutto India, nell'ambito di Paesi all'avanguardia come Stati Uniti e Repubblica di Corea deve essere interpretato come una precisa scelta progettuale[62]. Va comunque evidenziato che gli USA conservano una quota non trascurabile (rispetto alla media mondiale) di dighe sopra i 100 metri, a conferma del fatto che si tratta di una realtà territoriale federale dalle forti contraddizioni anche in termini ingegneristici (Figura 50).

[62] Japan Dam Foundation, «Dam Technologies of Japan»

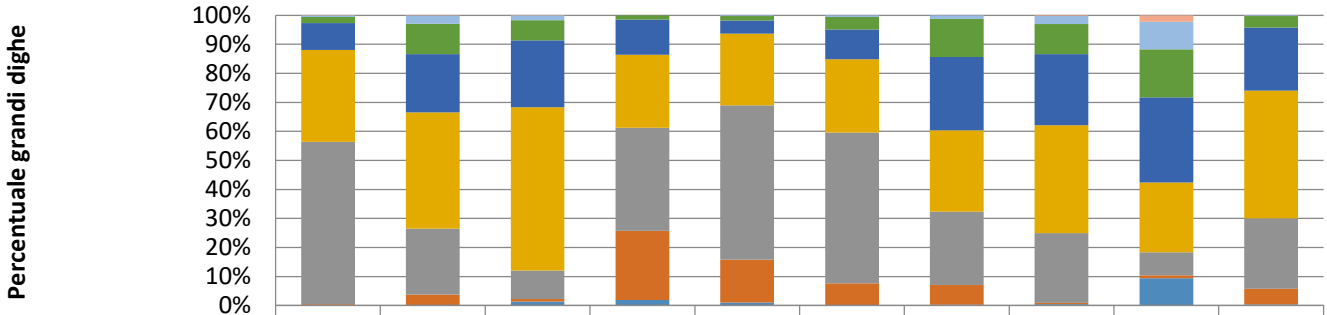
Figura 50 - L'Oroville Dam, la più alta degli USA con i suoi 235 metri

Giappone, Brasile e Francia si distaccano invece da questa preponderanza di dighe ad altezza limitata e presentano un andamento di altezze sempre decrescente, naturalmente, ma secondo un rapporto molto più regolare (Figura 51). Il Sudafrica arriva ad ospitare un invaso su due di altezza inferiore ai 20 metri, anche per la difficoltà logistica di realizzare opere più elevate in mancanza di dislivelli naturali sufficienti a costituire un supporto all'opera[63]. Infine, la distribuzione di Spagna e, in misura perfino maggiore, Turchia sembra stupire dal momento in cui si caratterizzano per una quota nettamente contenuta di dighe più basse di 30 metri (meno della metà del totale, complessivamente) a fronte di un particolare riguardo riservato agli invasi della classe 50-75 metri (intorno al 15%)

Figura 51 - La Belo Monte Dam in Brasile, che rientra nel programma di costruzione di grandi dighe del Paese

[63] http://www.sancold.org.za/index.php/about/about-dams/dams-in-south-africa

3.1.17 Correlazione Stato-Volume di Invaso



	China	United States of America	India	Japan	Korea (Rep. of)	South Africa	Spain	Turkey	Brazil	France
Max 10^10 Classe 10	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Max 10^9 Classe 9	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Max 10^8 Classe 8	0.07%	0.13%	0.06%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.32%	2.29%	0.00%
Max 10^7 Classe 7	0.49%	2.82%	1.68%	0.00%	0.31%	0.57%	1.30%	2.76%	9.43%	0.31%
Max 10^6 Classe 6	2.18%	10.41%	6.91%	1.54%	1.48%	4.36%	13.07%	10.31%	16.57%	3.89%
Max 10^5 Classe 5	9.19%	20.07%	23.03%	12.08%	4.53%	10.24%	25.32%	24.44%	29.29%	21.81%
Max 10^4 Classe 4	31.69%	40.07%	56.24%	25.19%	24.67%	25.21%	27.92%	37.19%	24.14%	43.93%
Max 10^3 Classe 3	55.93%	22.71%	9.87%	35.43%	53.24%	52.04%	25.32%	24.02%	7.86%	24.30%
Max 10^2 Classe 2	0.41%	3.70%	0.84%	23.85%	14.75%	7.49%	6.83%	0.53%	1.00%	5.45%
Max 10^1 Classe 1	0.05%	0.09%	1.37%	1.91%	1.01%	0.09%	0.24%	0.43%	9.43%	0.31%

Stato

Figura 52 - Correlazione Stati-Volume Invaso per le grandi dighe

Data la naturale correlazione parziale tra altezza e capacità di invaso (per quanto ovviamente non direttamente proporzionale), si potrebbe ipotizzare un andamento per ogni Stato comparabile con il grafico precedente (Figura 52). Al contrario, la distribuzione interna appare peculiare. Il range di invasi in Cina risulta pressoché coperto unicamente dalla fascia 1000-100000 mc, cosa che ribadisce la presenza di un numero significativo di piccoli invasi[64]. Agli antipodi di tale configurazione troviamo il Brasile, una nazione che può contare su risorse idriche davvero considerevoli (Figura 53) , che punta a sfruttare anche tramite impianti ad ampio bacino (ad esempio, è l'unico dei 10 Stati in esame a ospitare una quota non trascurabile di invasi in classe 8, ovvero ricadenti nell'intervallo dai 10 ai 100 milioni di metri cubi)[65].

[64] Cywinski «HYDROPOWER AND THE CANADIAN ECONOMY JOBS».
[65] De Mello, «Present situation of Dam Project in Brazil» (2014).

Figura 53 - La diga di Itaipu, che con i suoi 29 kmc di acqua costituisce uno dei maggiori invasi in Brasile

Le classi più diffuse restano la terza e la quarta, coerentemente con la media mondiale analizzata nelle sezioni precedenti. Tuttavia, si può comunque sottolineare che gli invasi europei (Spagna, Turchia e Francia) tendono a svilupparsi su volumi più considerevoli, in ragione del progresso tecnologico e della necessità, vista l'estensione territoriale limitata, di condensare le risorse idriche in pochi bacini strategici ad alta capacità. Nelle altre realtà territoriali raffigurate, quali Giappone e Corea del Sud, si assiste anche ad una proporzione delle prime due classi che indica la presenza di bacini con capienza decisamente inferiore alla media, sia per motivazioni logistiche, sia per potenziali errori di registrazione nel database.

3.1.18 Correlazione Stato-Anno di Costruzione

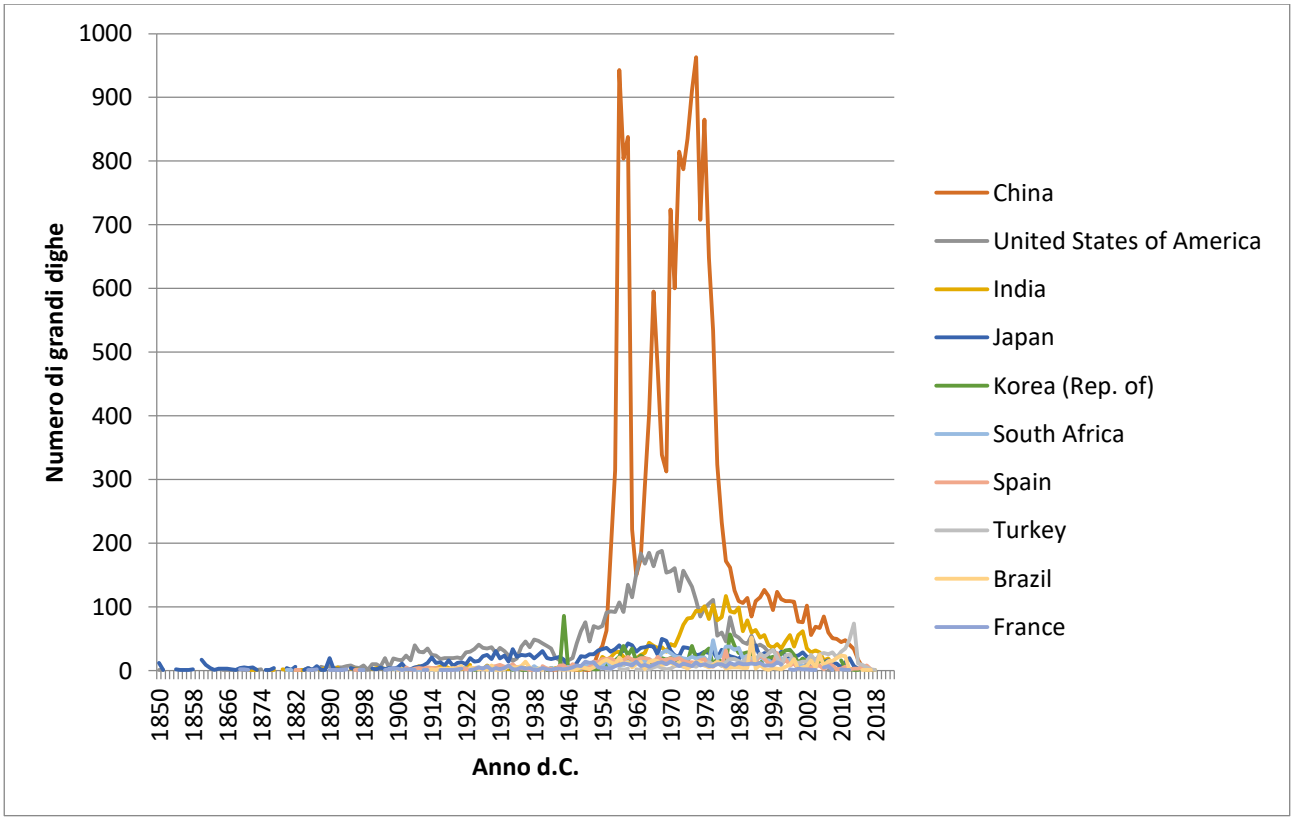


Figura 54 - Correlazione Stati-Anno di Costruzione per le grandi dighe

Come di consueto, la visualizzazione su base temporale è stata limitata al periodo 1850-2018 per evitare di rappresentare dati poco significativi dal punto di vista dell'affidabilità statistica e favorire invece il range in cui effettivamente si registrano evoluzioni regolari e ben documentate (Figura 54. Vista tuttavia la preponderanza dei record di origine cinese (5 volte più numerosi del secondo Stato più rappresentato), la leggibilità risulta comunque difficoltosa. Si è quindi deciso di analizzare separatamente gli altri Paesi, in modo da poter correlare gli andamenti tra loro. Limitandosi alla Cina, in accordo con le tempistiche del Grande Balzo in Avanti, si registra un'impennata improvvisa a cavallo tra gli anni '40 e '50, che termina con un profonda crollo dieci anni più tardi (in concomitanza con la crisi economica che ha investito il Paese dopo l'immane sforzo iniziale di modernizzazione); dopodiché si assiste ad un nuovo incremento che porta il numero di nuove dighe per anno su livelli analoghi al boom precedente, a seguito di nuove politiche di sviluppo industriale portate avanti dal governo cinese, a loro volta conclusesi con un arresto improvviso a metà degli anni Ottanta e infine caratterizzate da una stabilizzazione in lenta decrescita[66].

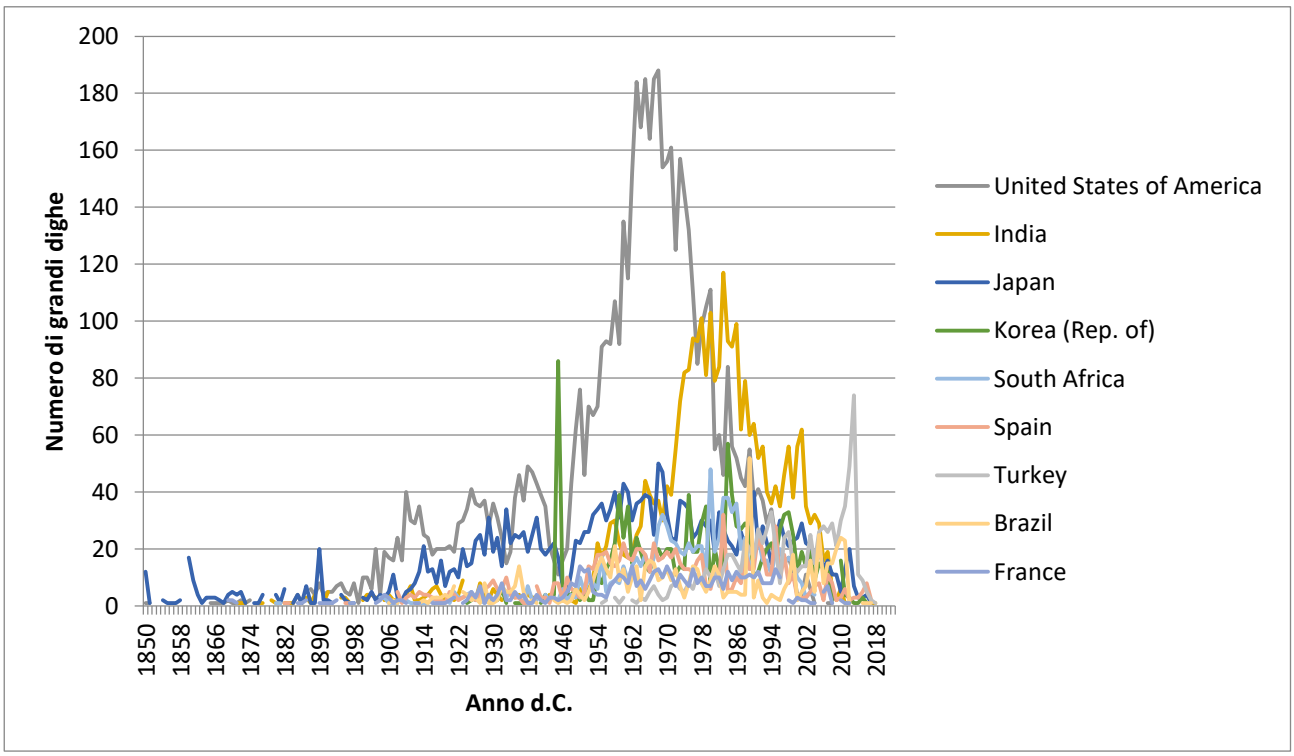


Figura 55 - Correlazione Stati-Anno di Costruzione (dal 1850)

Se si esclude qualche inevitabile deviazione statistica, gli altri Paesi si distinguono per una distribuzione meno caotica, caratterizzate tendenzialmente da un picco isolato in diversi periodi storici (Figura 55). I primi a giungere al massimo di costruzione di grandi dighe sono stati gli Statunitensi tra gli anni '60 e '70, anche se la diffusione di invasi era già stata intrapresa con largo anticipo sul finire del XIX secolo (durante cui si registra un aumento contenuto ma costante nel tempo)[67]. Un'altra realtà che si è dimostrata molto previdente è stata il Giappone, in cui tra l'altro l'andamento appare singolarmente costante per tutto il Novecento, ad eccezione del crollo inevitabile di record negli anni a ridosso della Seconda Guerra Mondiale (malgrado una rapida

[66] Brandt et al, «Industrialization in China».
[67] Billington, Jackson, e Melosi, «THE HISTORY OF LARGE FEDERAL DAMS: PLANNING, DESIGN, AND CONSTRUCTION IN THE ERA OF BIG DAMS».

ripresa subito dopo le devastazioni del conflitto)[68]. L'India invece deve attendere il secondo dopoguerra per imitare il progetto di costruzione delle grandi dighe, arrivando al target massimo soltanto poco prima della fine del secolo. Il dato della Corea del Sud, invece, si configura come fortemente irregolare a causa di improvvisi aumenti in corrispondenza di campagne di costruzione concentrate.

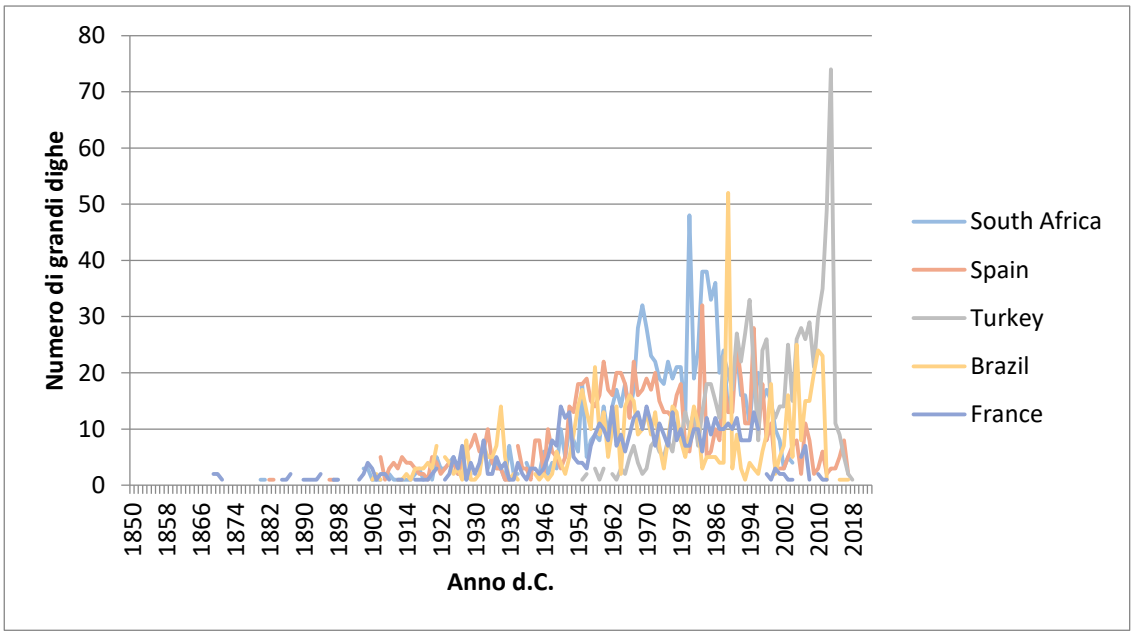


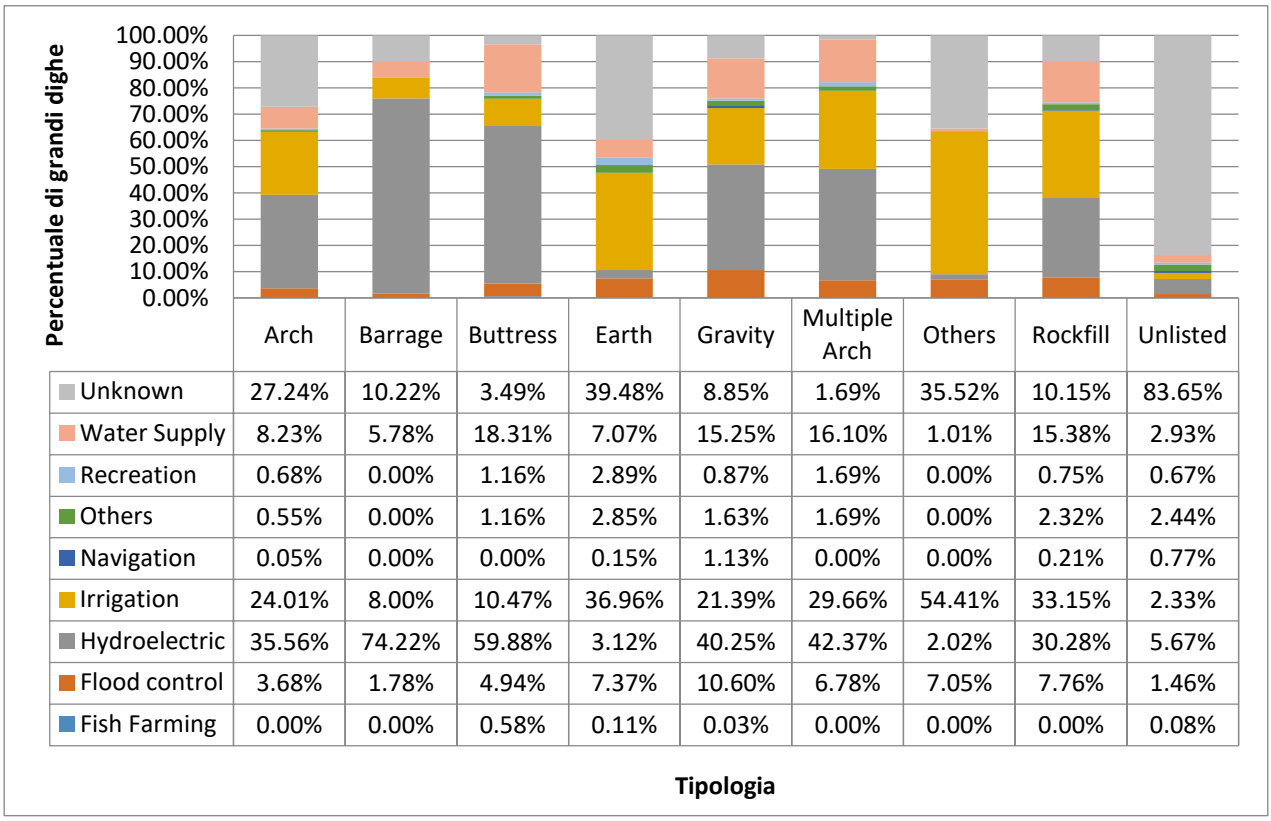
Figura 56 - Correlazione Stati-Anno di Costruzione (zoomato)

I rimanenti Stati presentano una configurazione abbastanza simile, che si può tradurre con un generalizzato aumento del tasso di costruzione durante gli Anni '70 prima del fisiologico declino e lo spostamento del focus sull'ottimizzazione degli impianti più vecchi (Figura 56). L'unica eccezione è costituita dalla Turchia che evidenzia un picco addirittura intorno al 2010 (Figura 57) e una crescita marcata durante tutti i primi vent'anni del XXI secolo[69].

Figura 57 - La Ilisu Dam (Turchia), la cui costruzione, iniziata nel 2006, rientra nel programma di ammodernamento industriale del Paese

[68] JCOLD «Overwiev on Japan Large Dams».
[69] Vine e Kurdish, «The Cultural and Environmental Impact of Large Dams in Turkey» (2004).

3.1.19 Correlazione Tipologia-Funzione



	Arch	Barrage	Buttress	Earth	Gravity	Multiple Arch	Others	Rockfill	Unlisted
Unknown	27.24%	10.22%	3.49%	39.48%	8.85%	1.69%	35.52%	10.15%	83.65%
Water Supply	8.23%	5.78%	18.31%	7.07%	15.25%	16.10%	1.01%	15.38%	2.93%
Recreation	0.68%	0.00%	1.16%	2.89%	0.87%	1.69%	0.00%	0.75%	0.67%
Others	0.55%	0.00%	1.16%	2.85%	1.63%	1.69%	0.00%	2.32%	2.44%
Navigation	0.05%	0.00%	0.00%	0.15%	1.13%	0.00%	0.00%	0.21%	0.77%
Irrigation	24.01%	8.00%	10.47%	36.96%	21.39%	29.66%	54.41%	33.15%	2.33%
Hydroelectric	35.56%	74.22%	59.88%	3.12%	40.25%	42.37%	2.02%	30.28%	5.67%
Flood control	3.68%	1.78%	4.94%	7.37%	10.60%	6.78%	7.05%	7.76%	1.46%
Fish Farming	0.00%	0.00%	0.58%	0.11%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.08%

Figura 58 - Correlazione Tipo-Funzione per le grandi dighe

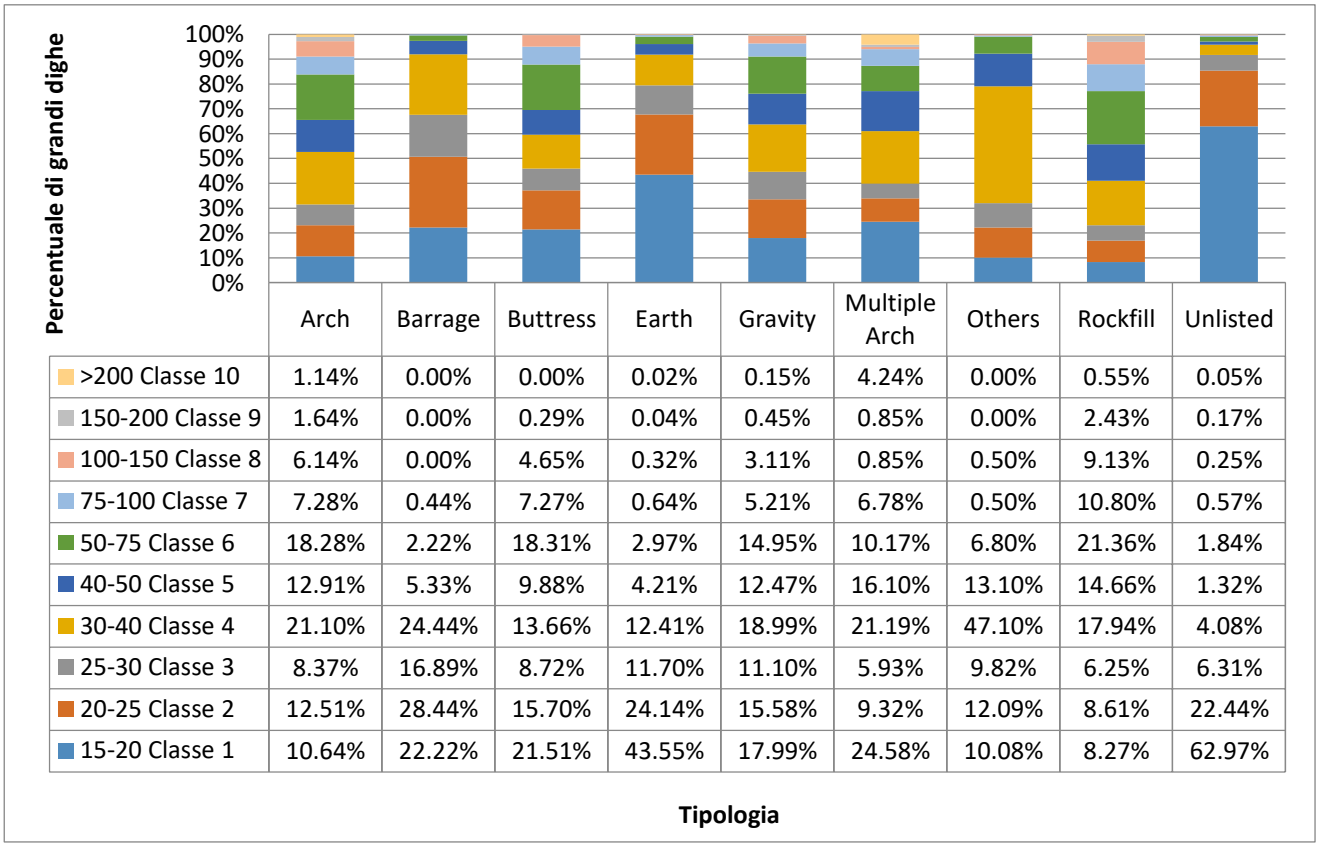
Come prevedibile, le dighe ad arco (singolo e multiplo), a speroni, a gravità e in roccia, presentano una suddivisione funzionale analoga, essendo votate principalmente alla produzione di energia idroelettrica e all'irrigazione, oltre ad una quota inferiore di approvvigionamento idrico e funzioni minori quasi trascurabili (Figura 58)[70]. La differenza appare evidente rispetto alle dighe in terra, la cui componente di idroelettrico sfiora lo zero, privilegiando al contrario in massima parte gli scopi legati all'agricoltura e al controllo delle piene (Figura 59)[71]. Questo perché gli impianti idroelettrici devono lavorare con quantitativi molto elevati di acqua per essere efficienti e richiedono componenti elettro-meccaniche difficilmente compatibili con una struttura in terra, per quanto efficiente. Un'ulteriore conferma della bontà del database arriva dalla classificazione funzionale degli sbarramenti, che per quasi tre quarti sono dedicati, giustamente, alla conversione del moto idrico in energia idroelettrica, vista la loro scarsa capacità di accumulo se confrontati con altre tipologie.

[70] Ansar et al., «Should We Build More Large Dams?»
[71] Stephens «Manual on small earth dams » (2010).

Figura 59 - Susri Dam (India), uno sbarramento dedicato all'irrigazione e all'accumulo idrico

Le dighe di funzione non nota si concentrano da un lato sulle tipologie strutturali a loro volta ignote oppure classificate come "alternative", e questo non deve sorprendere; dall'altro, invece, si prendono una quota non indifferente (dal 20 al 40%) delle dighe ad arco e soprattutto in terra. Se per quest'ultima una spiegazione potrebbe risiedere nella loro natura meno tecnologica, quindi legata a realtà territoriali meno interessate a comunicare dati, le dighe ad arco si dimostrano tradizionalmente molto documentate e ciò contrasta con la mancanza di dati.

3.1.20 Correlazione Tipologia-Altezza

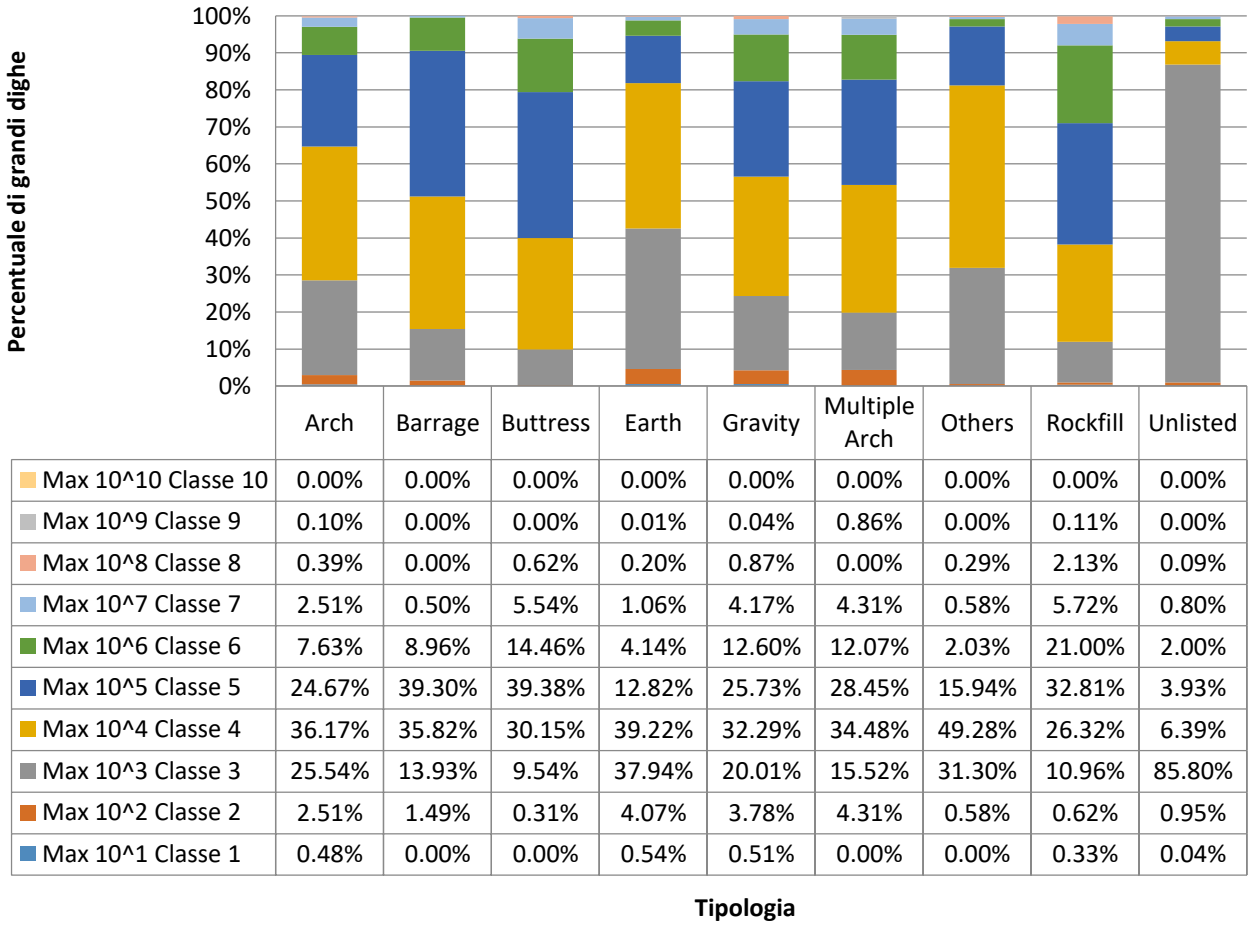


	Arch	Barrage	Buttress	Earth	Gravity	Multiple Arch	Others	Rockfill	Unlisted
>200 Classe 10	1.14%	0.00%	0.00%	0.02%	0.15%	4.24%	0.00%	0.55%	0.05%
150-200 Classe 9	1.64%	0.00%	0.29%	0.04%	0.45%	0.85%	0.00%	2.43%	0.17%
100-150 Classe 8	6.14%	0.00%	4.65%	0.32%	3.11%	0.85%	0.50%	9.13%	0.25%
75-100 Classe 7	7.28%	0.44%	7.27%	0.64%	5.21%	6.78%	0.50%	10.80%	0.57%
50-75 Classe 6	18.28%	2.22%	18.31%	2.97%	14.95%	10.17%	6.80%	21.36%	1.84%
40-50 Classe 5	12.91%	5.33%	9.88%	4.21%	12.47%	16.10%	13.10%	14.66%	1.32%
30-40 Classe 4	21.10%	24.44%	13.66%	12.41%	18.99%	21.19%	47.10%	17.94%	4.08%
25-30 Classe 3	8.37%	16.89%	8.72%	11.70%	11.10%	5.93%	9.82%	6.25%	6.31%
20-25 Classe 2	12.51%	28.44%	15.70%	24.14%	15.58%	9.32%	12.09%	8.61%	22.44%
15-20 Classe 1	10.64%	22.22%	21.51%	43.55%	17.99%	24.58%	10.08%	8.27%	62.97%

Figura 60 - Correlazione Tipologia-Altezza per le grandi dighe

E' interessante notare come quasi la metà delle dighe in terra si mantenga nel range 15-20 m, e che comunque presenti un trend molto spiccato di riduzione delle numerosità con l'aumentare dell'altezza (Figura 60). Si tratta di una naturale conseguenza della tipologia strutturale, che offre un'ottima soluzione a basso costo (il materiale da costruzione può spesso essere raccolto in loco, previa analisi granulometrica) fino a quando il peso dell'opera non diventa insostenibile[72]. La tipologia strutturale che sembra prestarsi meglio per ogni classe di altezza è Rockfill, in quanto non richiede particolare esigenze per la compattazione e le sue criticità riguardano più che altro la qualità della fondazione, meno invece lo sviluppo in altezza[73]. Gli sbarramenti, per la loro natura di captazione associata a capacità di invaso moderate, tendono a fermarsi al di sotto dei 50 metri, ma entro questa soglia sembrano diffusi in maniera omogenea. Se si punta a raggiungere altezze elevate (sopra i 100 metri), le soluzioni strutturali più adeguate sono costituite dalla sopra citata Rockfill, dalle dighe a speroni e da quelle ad arco. In particolare, le dighe ad arco singolo risultano quasi del tutto incompatibili con le altezze più contenute, sia per ragioni di logistica che di rapporto costi-benefici; al contrario registrano una notevole occorrenza tra i 30 e i 100 metri.

3.1.21 Correlazione Tipologia-Volume di Invaso



	Arch	Barrage	Buttress	Earth	Gravity	Multiple Arch	Others	Rockfill	Unlisted
Max 10^10 Classe 10	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Max 10^9 Classe 9	0.10%	0.00%	0.00%	0.01%	0.04%	0.86%	0.00%	0.11%	0.00%
Max 10^8 Classe 8	0.39%	0.00%	0.62%	0.20%	0.87%	0.00%	0.29%	2.13%	0.09%
Max 10^7 Classe 7	2.51%	0.50%	5.54%	1.06%	4.17%	4.31%	0.58%	5.72%	0.80%
Max 10^6 Classe 6	7.63%	8.96%	14.46%	4.14%	12.60%	12.07%	2.03%	21.00%	2.00%
Max 10^5 Classe 5	24.67%	39.30%	39.38%	12.82%	25.73%	28.45%	15.94%	32.81%	3.93%
Max 10^4 Classe 4	36.17%	35.82%	30.15%	39.22%	32.29%	34.48%	49.28%	26.32%	6.39%
Max 10^3 Classe 3	25.54%	13.93%	9.54%	37.94%	20.01%	15.52%	31.30%	10.96%	85.80%
Max 10^2 Classe 2	2.51%	1.49%	0.31%	4.07%	3.78%	4.31%	0.58%	0.62%	0.95%
Max 10^1 Classe 1	0.48%	0.00%	0.00%	0.54%	0.51%	0.00%	0.00%	0.33%	0.04%

Figura 61 - Correlazione Tipologia-Bacino per le grandi dighe

[72] Stephens, «Manual on small earth dams » (2010).
[73] Alonso e Cardoso, «Behavior of materials for earth and rockfill dams » (2010).

La correlazione tra la tipologia strutturale e la capacità di invaso mostra risultati comparabili per tutte le tipologie strutturali, pur con qualche differenza peculiare (Figura 61). Ad esempio, come prevedibile, le dighe in terra prediligono volumi non troppo ampi, al punto tale che i bacini al di sotto dei 10 000 mc (classi 1-4) costituiscono più dell'80% di tale tipologia. Ragionamento analogo per gli sbarramenti, come già ampiamente trattato in precedenza risultano efficienti per volumi più contenuti rispetto alle dighe maggiori. Dall'interpretazione grafica consegue inoltre che, nel momento in cui si necessita di accumulare grandi quantità d'acqua, le tipologie più indicate sono quelle ad arco e a gravità, sicuramente anche grazie alla stabilità e alla sicurezza offerta dal calcestruzzo armato con cui sono tendenzialmente realizzate (Figura 62)[74].

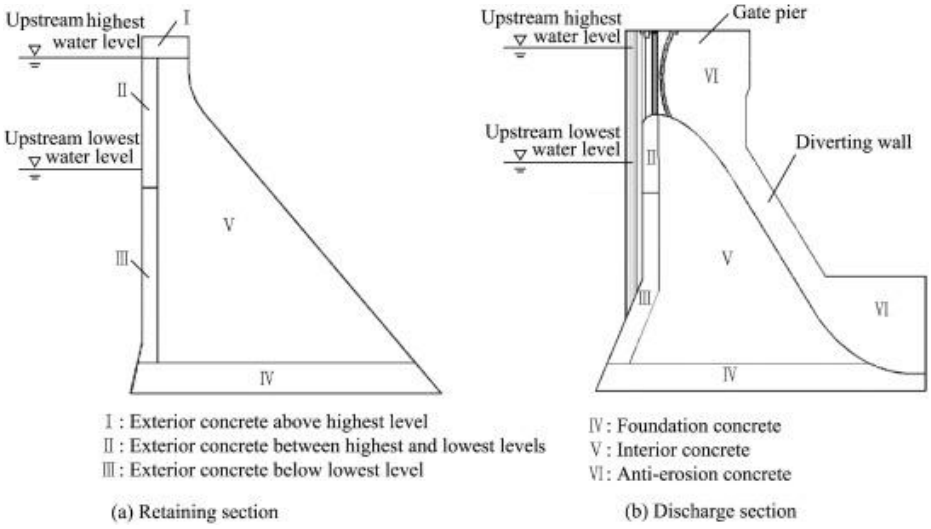


Figura 62 - Sezione tipica di una diga in cemento ad alta resistenza

Si tratta di una considerazione molto simile a quella a cui si è pervenuti nell'ambito della correlazione con le altezze, cosa che suggerisce un approfondimento sul rapporto tra volume e sviluppo verticale dell'opera. Non stupisce infine che la maggior parte degli invasi non registrati in termini di tipologia strutturale siano costituiti da invasi al di sotto di 1000 10^3mc, quindi dall'interesse tecnico limitato.

[74] Oliveira et al., «Monitoring the Structural Integrity of Large Concrete Dams: The Case of Cabril Dam, Portugal».

3.1.22 Correlazione Tipologia-Anno di Costruzione

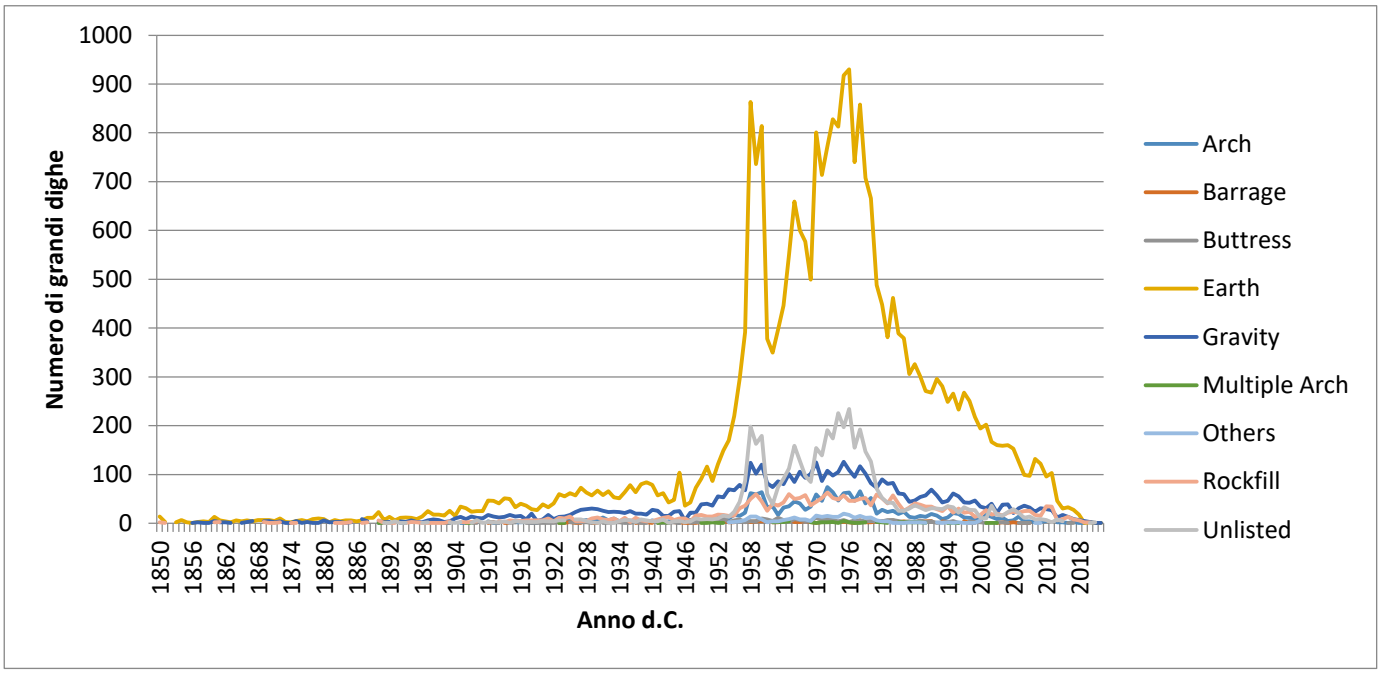


Figura 63 - Correlazione Tipologia-Anno di Costruzione per le grandi dighe (dal 1850)

Ancora una volta, si è scelto di rappresentare unicamente i record posteriori al 1850 per il giusto compromesso tra leggibilità e completezza (Figura 63). Si nota immediatamente come la prima tipologia strutturale a svilupparsi sia stata quella in terra, per la diffusa disponibilità di materiale e le tecniche di realizzazione che non prevedono accorgimenti tecnologici troppo avanzati (al punto tale da essere diffusi già in epoca romana, vedasi Figura 64); questo a partire dalla fine dell'Ottocento[75].

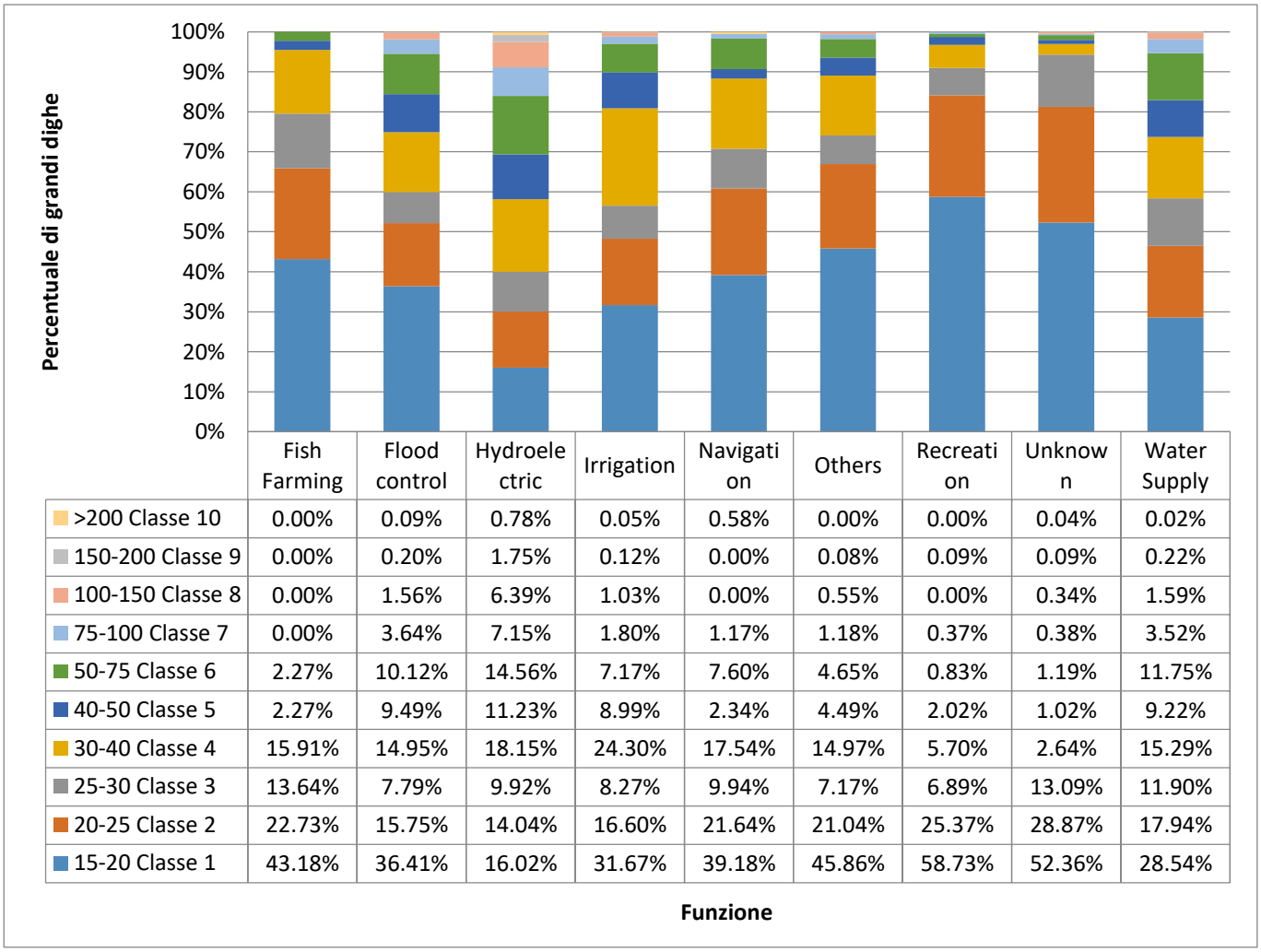
Figura 64 - La diga di Proserpina (Spagna), un invaso in terra risalente al II secolo d.C.

D'altro canto, dopo il picco di diffusione nel secondo Dopoguerra, le dighe in terra sono quelle che hanno vissuto la diminuzione più pronunciata (ad eccezione di quelle classificate come "Unlisted", la cui motivazione rimane puramente statistica, dipendente dal fatto che negli ultimi anni sono stati intensificati gli sforzi da parte di ICOLD per massimizzare le informazioni raccolte dalle nuove dighe in costruzione). In seguito, le dighe a gravità hanno vissuto un periodo di costante diffusione che si è protratto per tutto il XX secolo fino al giorno d'oggi, registrando un calo molto più

[75] Gudgeon, Walbancke, «Design and performance of 19th-century earth dams»

contenuto della media[76]. Le dighe ad arco, sia singolo che multiplo, si sono caratterizzate per un periodo d'oro durante gli anni '60 e '70, che è terminato a causa della loro esposizione marcata ad attentati terroristici e fattori ambientali; un andamento pressoché coincidente è associato agli invasi Rockfill, che non a caso ricoprono un campo d'impiego molto simile[77].

3.1.23 Correlazione Funzione-Altezza



	Fish Farming	Flood control	Hydroelectric	Irrigation	Navigation	Others	Recreation	Unknown	Water Supply
>200 Classe 10	0.00%	0.09%	0.78%	0.05%	0.58%	0.00%	0.00%	0.04%	0.02%
150-200 Classe 9	0.00%	0.20%	1.75%	0.12%	0.00%	0.08%	0.09%	0.09%	0.22%
100-150 Classe 8	0.00%	1.56%	6.39%	1.03%	0.00%	0.55%	0.00%	0.34%	1.59%
75-100 Classe 7	0.00%	3.64%	7.15%	1.80%	1.17%	1.18%	0.37%	0.38%	3.52%
50-75 Classe 6	2.27%	10.12%	14.56%	7.17%	7.60%	4.65%	0.83%	1.19%	11.75%
40-50 Classe 5	2.27%	9.49%	11.23%	8.99%	2.34%	4.49%	2.02%	1.02%	9.22%
30-40 Classe 4	15.91%	14.95%	18.15%	24.30%	17.54%	14.97%	5.70%	2.64%	15.29%
25-30 Classe 3	13.64%	7.79%	9.92%	8.27%	9.94%	7.17%	6.89%	13.09%	11.90%
20-25 Classe 2	22.73%	15.75%	14.04%	16.60%	21.64%	21.04%	25.37%	28.87%	17.94%
15-20 Classe 1	43.18%	36.41%	16.02%	31.67%	39.18%	45.86%	58.73%	52.36%	28.54%

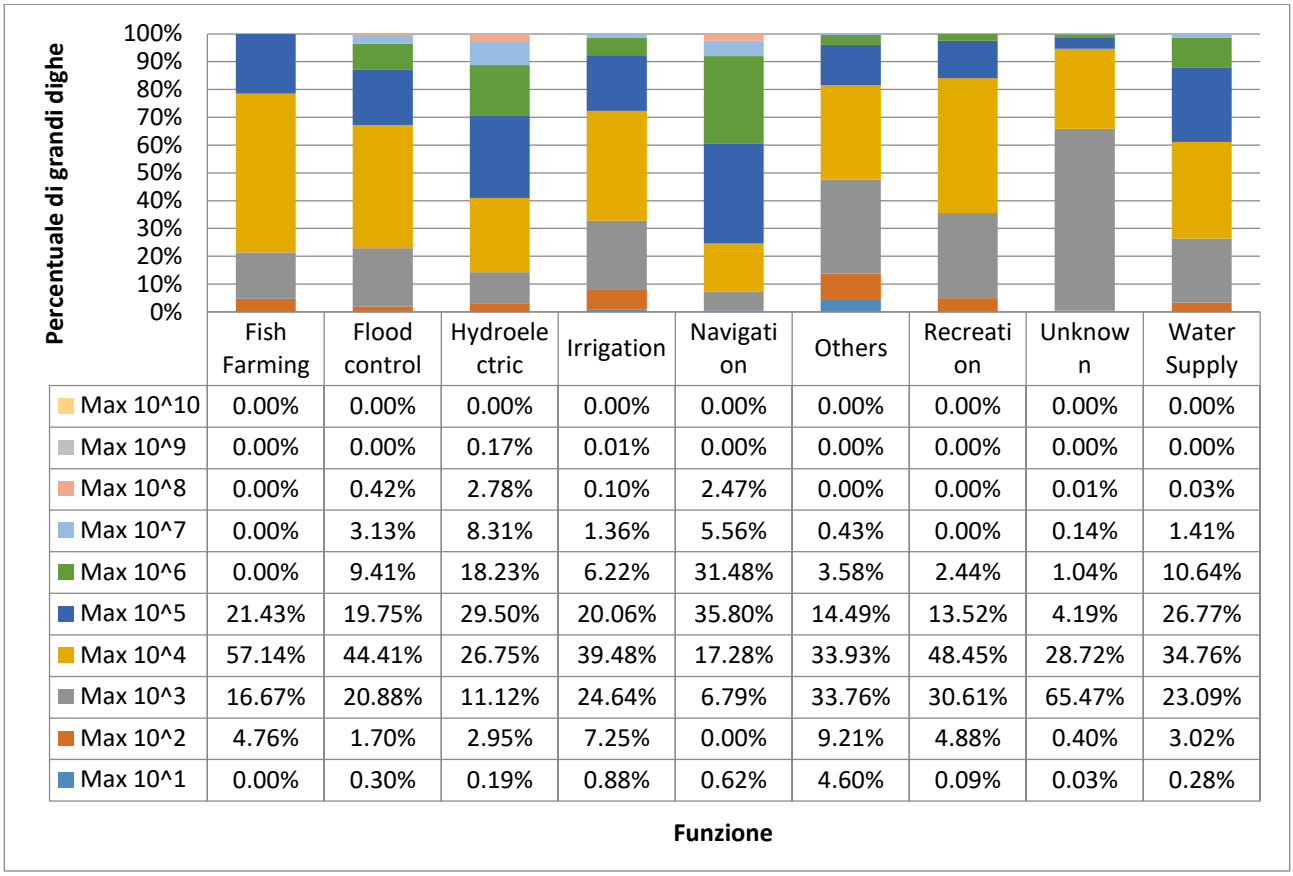
Figura 65 - Correlazione Funzione-Altezza per le grandi dighe

Se si opera una classificazione comparata sulla base dell'altezza e della funzione degli invasi, si evince come le dighe ad altezza contenuta siano più diffuse nell'ambito delle attività accessorie delle grandi dighe: ricreazione, pesca e altre funzioni minori vengono svolte in invasi che per circa la metà delle rispettive popolazioni non superano i 20 metri di altezza (Figura 65). Si tratta naturalmente di scopi per cui non è richiesta una capacità notevole, e di conseguenza nemmeno un'altezza elevata. Discorso opposto per le dighe adibite a bacini idroelettrici: queste raramente si sviluppano per meno di 30 metri, e sono quelle ad avere una diffusione più pronunciata all'interno delle sottoclassi più alte. Un carico idrico elevato consente infatti di massimizzare l'energia prodotta. Gli utilizzi connessi all'accumulo di acqua, sia per redistribuzione che nell'ottica di

[76] Bureau of Reclamation (USA Department of Interior), «Design of Gravity Dams».
[77] Wilson, Squier, «Earth and Rockfill Dams».

contenimento rispetto ad una piena si distinguono per una distribuzione in altezza molto regolare e comparabile, condizione compatibile con la duttilità funzionale che esse devono dimostrare a seconda delle esigenze locali. In accordo poi con quanto rimarcato a più riprese ai punti precedenti, nel caso di record non definiti dal punto di vista della funzione (ovvero classificati come "Unknown"), la popolazione di dighe tende a collocarsi in massima parte verso le classi di altezza inferiori, in quanto i grandi invasi si prestano meno frequentemente ad una comunicazione incompleta delle proprie caratteristiche.

3.1.24 Correlazione Funzione-Volume di Invaso



	Fish Farming	Flood control	Hydroelectric	Irrigation	Navigation	Others	Recreation	Unknown	Water Supply
Max 10^10	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Max 10^9	0.00%	0.00%	0.17%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Max 10^8	0.00%	0.42%	2.78%	0.10%	2.47%	0.00%	0.00%	0.01%	0.03%
Max 10^7	0.00%	3.13%	8.31%	1.36%	5.56%	0.43%	0.00%	0.14%	1.41%
Max 10^6	0.00%	9.41%	18.23%	6.22%	31.48%	3.58%	2.44%	1.04%	10.64%
Max 10^5	21.43%	19.75%	29.50%	20.06%	35.80%	14.49%	13.52%	4.19%	26.77%
Max 10^4	57.14%	44.41%	26.75%	39.48%	17.28%	33.93%	48.45%	28.72%	34.76%
Max 10^3	16.67%	20.88%	11.12%	24.64%	6.79%	33.76%	30.61%	65.47%	23.09%
Max 10^2	4.76%	1.70%	2.95%	7.25%	0.00%	9.21%	4.88%	0.40%	3.02%
Max 10^1	0.00%	0.30%	0.19%	0.88%	0.62%	4.60%	0.09%	0.03%	0.28%

Figura 66 - Correlazione Funzione-Volume di Invaso per le grandi dighe

La correlazione tra capacità di invaso e funzione dello stesso (Figura 66) conferma il trend già emerso al punto precedente, ovvero una netta divisione tra quei bacini che necessitano di una capacità limitata per svolgere le attività a cui sono deputati (pesca, navigazione e ricreazione) e quelli che invece per propria natura esigono grandi quantitativi di acqua (irrigazione, approvvigionamento, controllo piene e idroelettrico). Entrando nel dettaglio, è emblematica la suddivisione relativa ai bacini con scopi di produzione di energia, in cui più del 10% del totale della popolazione presenta un invaso superiore al milione di metri cubi, una soglia che al contrario la maggior parte delle altre tipologie fatica addirittura a raggiungere[78]. Nuovamente, l'entità di volume che deve essere messa a disposizione per l'approvvigionamento e per la sicurezza nei confronti delle alluvioni tende praticamente ad equivalersi.

[78] Biswas, «Impacts of Large Dams Issues, Opportunities and Constraints» (2012).

3.1.25 Correlazione Funzione-Anno di Costruzione

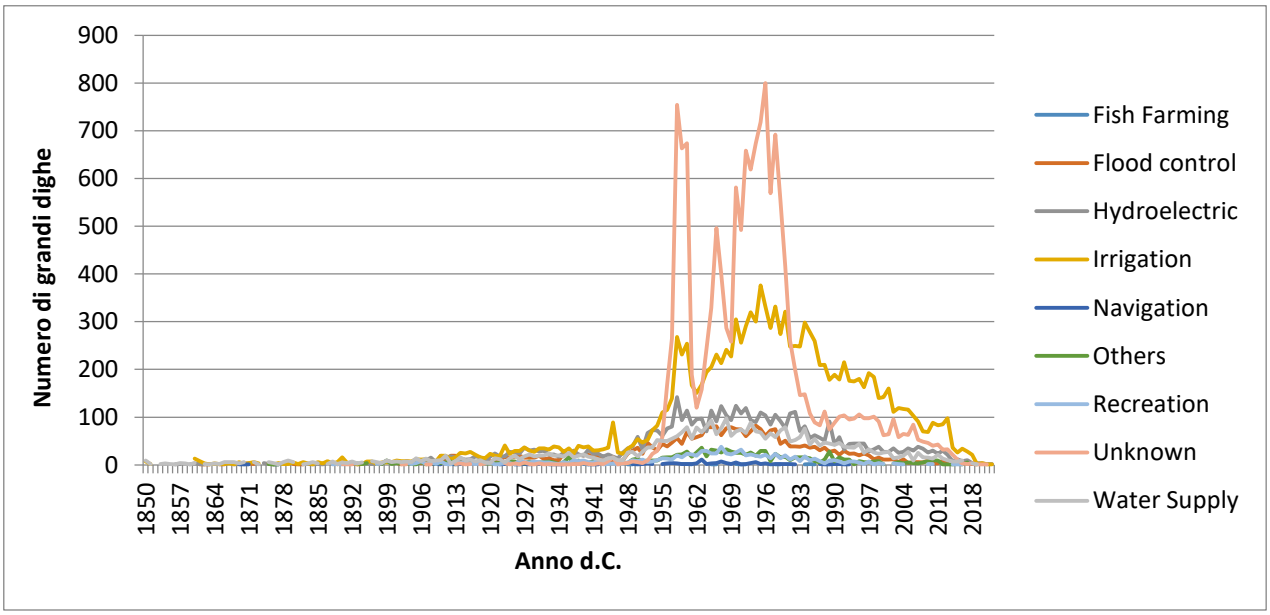


Figura 67 - Correlazione Funzione-Anno di Costruzione per le grandi dighe (dal 1850)

Al netto dell'andamento (peraltro molto irregolare) delle dighe di cui non è nota la funzione nel tempo, la distribuzione temporale delle dighe legate ad attività effettivamente registrate appare molto uniforme (Figura 67). Questo si può spiegare in prima analisi con il fatto che tutti gli scopi classificati nel database erano già diffusi nel XIX secolo, dopodiché hanno seguito un'evoluzione parallela; inoltre, eventuali differenze locali che vadano a privilegiare, in un determinato arco temporale, alcune attività rispetto ad altre tenderebbero naturalmente ad essere bilanciate su scala mondiale, come effettivamente avviene. L'unico andamento che si discosta leggermente da tale ragionamento è quello delle dighe legate al mondo agricolo, il quale presenta due picchi pronunciati e temporalmente prossimi: uno più basso e situato all'inizio degli anni '60, l'altro più intenso del 50% circa e spalmato durante l'intero corso degli anni '70. Da ricerche di approfondimento, si può immaginare che tali concentrazioni vadano a fotografare il boom agricolo dei Paesi emergenti che hanno intrapreso la strada verso lo status di potenza mondiale proprio in quegli anni (si pensi, ad esempio, al "Grande Balzo in Avanti" imposto da Mao nella Cina all'inizio della seconda metà del secolo, vedasi Figura 68)[79].

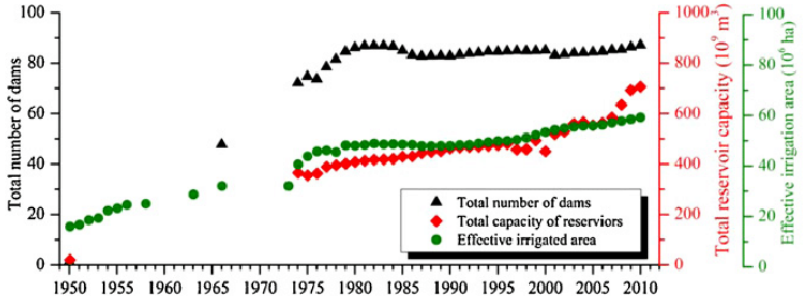
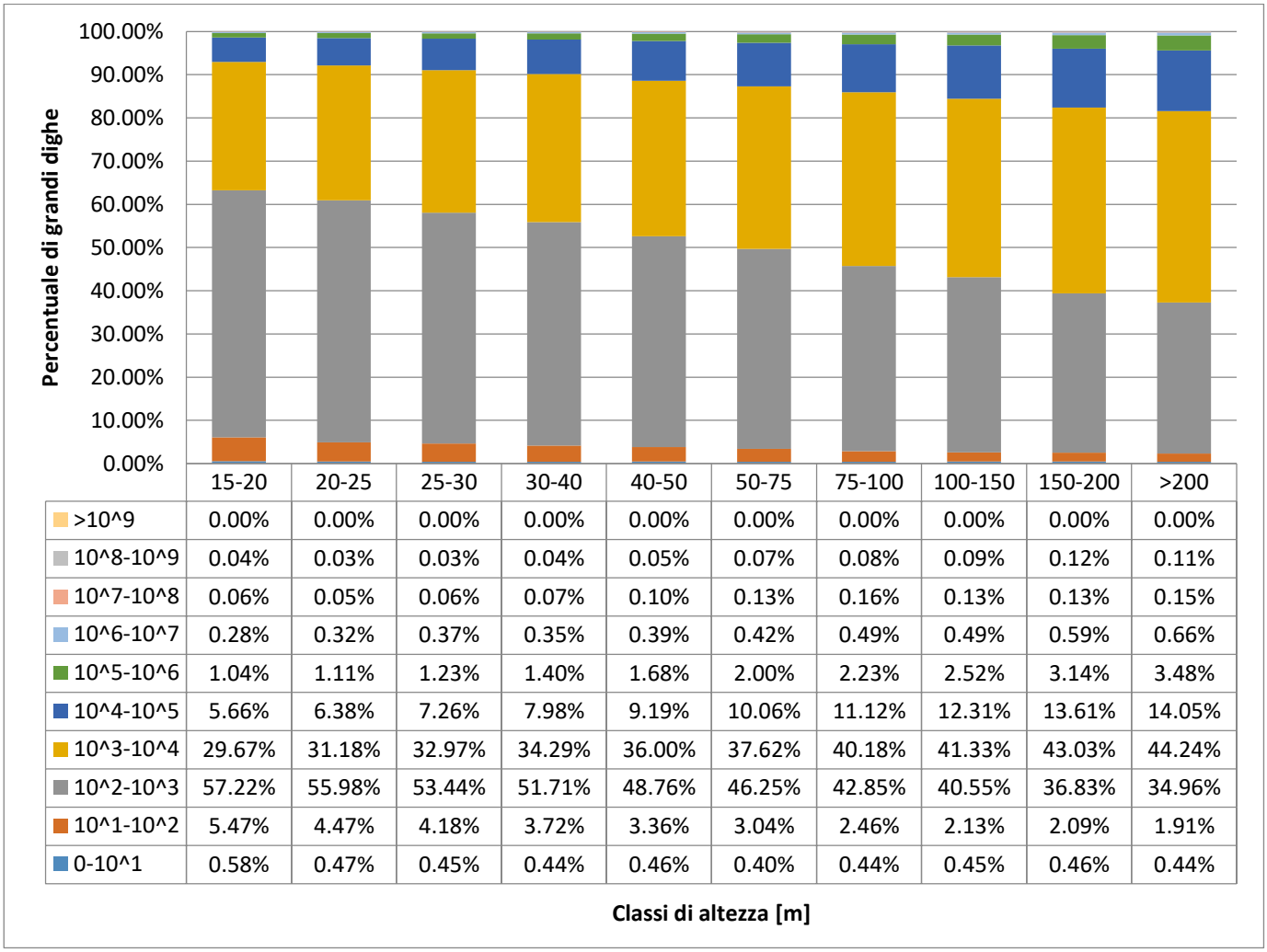


Figura 68 - Grafico che fotografa i due periodi di costruzione delle dighe in Cina (1950 e 1970)

[79] Paarlberg D., Paarlberg P., «The Agricultural Revolution of the 20th Century»

Inoltre, subito dopo la Seconda Guerra Mondiale la popolazione mondiale ha registrato un aumento repentino che, almeno in principio, si è tradotto nell'esigenza di adibire aree sempre maggiori a campi coltivati, con conseguente richiesta di regolazione dell'alimentazione idrica. Infine, l'idroelettrico è stato l'ultimo campo ad arrendersi alla naturale diminuzione nella progettazione di nuovi bacini, sintomo della crescente fiducia che è stata riposta negli ultimi anni in questa forma di energia rinnovabile alternativa agli idrocarburi[80] .

3.1.26 Correlazione Altezza-Volume di Invaso



	15-20	20-25	25-30	30-40	40-50	50-75	75-100	100-150	150-200	>200
>10^9	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
10^8-10^9	0.04%	0.03%	0.03%	0.04%	0.05%	0.07%	0.08%	0.09%	0.12%	0.11%
10^7-10^8	0.06%	0.05%	0.06%	0.07%	0.10%	0.13%	0.16%	0.13%	0.13%	0.15%
10^6-10^7	0.28%	0.32%	0.37%	0.35%	0.39%	0.42%	0.49%	0.49%	0.59%	0.66%
10^5-10^6	1.04%	1.11%	1.23%	1.40%	1.68%	2.00%	2.23%	2.52%	3.14%	3.48%
10^4-10^5	5.66%	6.38%	7.26%	7.98%	9.19%	10.06%	11.12%	12.31%	13.61%	14.05%
10^3-10^4	29.67%	31.18%	32.97%	34.29%	36.00%	37.62%	40.18%	41.33%	43.03%	44.24%
10^2-10^3	57.22%	55.98%	53.44%	51.71%	48.76%	46.25%	42.85%	40.55%	36.83%	34.96%
10^1-10^2	5.47%	4.47%	4.18%	3.72%	3.36%	3.04%	2.46%	2.13%	2.09%	1.91%
0-10^1	0.58%	0.47%	0.45%	0.44%	0.46%	0.40%	0.44%	0.45%	0.46%	0.44%

Figura 69 - Correlazione Altezza-Volume di Invaso per le grandi dighe

La correlazione tra altezza e capacità di invaso si dimostra fedele alle aspettative: con l'aumentare della classe di altezza, i range di invaso minori tendono a ridursi sempre di più, a vantaggio dei volumi più elevati (Figura 69). Naturalmente non esiste una proporzionalità diretta tra lo sviluppo verticale e quello volumico dell'opera, in quanto la forma del bacino dipende direttamente dalle caratteristiche geomorfologiche del sito e quindi varia per ogni caso. Trattandosi tuttavia di una raccolta di un numero di dati molto elevato, le differenze in questo senso vengono parzialmente appianate dall'operazione di categorizzazione e si assiste infatti ad un andamento sorprendentemente regolare. Risultano infatti molto esigui gli esempi di potenziale deviazione

[80] World Energy Counsil «World Energy Resources-Hydropower » (2016).

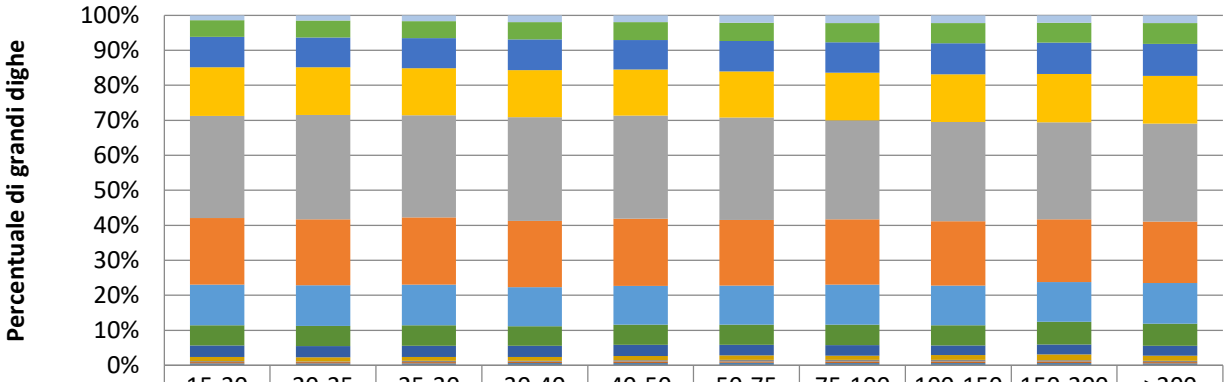
statistica, quali le combinazioni più improbabili (15-20 e 10^8-10^9, oppure 0-10^1 e >200). Non è tuttavia possibile escludere a priori la possibilità di avere invasi bassi ma dalla capienza elevatissima; è il caso della Aswan Low Dam, che concilia un'altezza di 36 metri con un invaso superiore ai 10^6 10^3 mc (Figura 70)

Figura 70 - La Aswan Low Dam, che combina un'altezza di 36 metri con un invaso superiore ai 10^9 mc

E' interessante notare come la classe di volume più frequente resti sempre la terza, quella associata ad un invaso compreso tra i 100 e i 1000 metri cubi; tale uniformità di distribuzione (paragonabile a quella delle altre classi intermedie) è spiegabile in quanto le dighe vengono spesso progettate non tanto in base all'altezza da raggiungere, bensì secondo le necessità di invaso per coprire le necessità idriche connesse alla funzione dell'opera. Solo in un secondo momento si va a tarare lo sviluppo verticale in funzione del volume-obiettivo (e quindi in relazione con l'andamento altimetrico dell'area di cantiere).[81]

[81] New York State Department of Environmental Conservation, «Guidelines for Design of Dams»

3.1.27 Correlazione Altezza-Anno di Costruzione



	15-20	20-25	25-30	30-40	40-50	50-75	75-100	100-150	150-200	>200
>2010	1.43%	1.51%	1.67%	1.97%	1.99%	2.11%	2.21%	2.23%	2.11%	2.22%
2000-2010	4.70%	4.81%	4.85%	4.92%	5.12%	5.26%	5.51%	5.78%	5.76%	5.93%
1990-2000	8.71%	8.50%	8.58%	8.82%	8.43%	8.64%	8.66%	8.83%	8.92%	9.19%
1980-1990	13.94%	13.67%	13.43%	13.39%	13.10%	13.21%	13.71%	13.66%	13.82%	13.56%
1970-1980	29.12%	29.77%	29.19%	29.66%	29.45%	29.23%	28.20%	28.38%	27.67%	28.03%
1960-1970	19.01%	18.87%	19.24%	18.93%	19.23%	18.74%	18.66%	18.38%	17.91%	17.53%
1950-1960	11.63%	11.57%	11.59%	11.17%	11.05%	11.17%	11.46%	11.27%	11.38%	11.67%
1925-1950	5.80%	5.82%	5.83%	5.59%	5.80%	5.77%	5.86%	5.83%	6.45%	6.26%
1900-1925	3.26%	3.19%	3.26%	3.13%	3.19%	3.04%	2.94%	2.73%	2.90%	2.86%
1850-1900	1.20%	1.18%	1.11%	1.09%	1.15%	1.25%	1.25%	1.39%	1.58%	1.44%
1800-1850	0.25%	0.23%	0.29%	0.32%	0.40%	0.46%	0.47%	0.46%	0.43%	0.38%
1700-1800	0.40%	0.36%	0.37%	0.36%	0.41%	0.43%	0.38%	0.41%	0.41%	0.40%
0-1700	0.55%	0.52%	0.60%	0.64%	0.69%	0.70%	0.69%	0.66%	0.66%	0.53%

Figura 71 - Correlazione Altezza-Anno di Costruzione

La correlazione tra la distribuzione per periodi e quella in altezza si dimostra fortemente peculiare rispetto a tutte quelle analizzate finora (Figura 71). Infatti, l'andamento temporale tende ad equivalersi in prima approssimazione per ogni classe di altezza presa in considerazione; da ciò si può dedurre che le scelte strutturali non risultano pressoché del nulla influenzate dal momento storico, bensì unicamente da esigenze contingenti che possono riguardare la morfologia del sito, la tipologia di materiale e disposizione e, soprattutto, lo scopo per cui il bacino viene progettato. Aumentando il dettaglio dell'analisi si possono comunque far emergere alcune sottili differenze che si dimostrano coerenti con i ragionamenti e le fonti illustrati nel corso di questo paragrafo: in particolare, come è lecito attendersi, la percentuale di dighe ad elevato sviluppo verticale (oltre i 100 metri) rimane piuttosto basso fino all'inizio del XX secolo, almeno in relazione alle dighe più piccole[82].

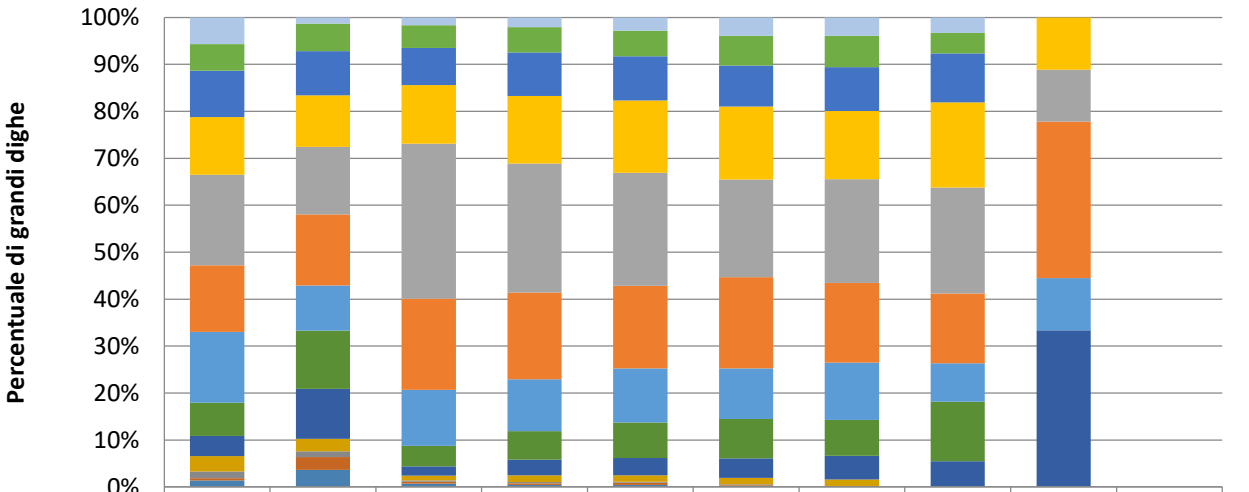
[82] Van de Giesen, «A brief history of 20th century dam construction and a look into the future»

Figura 72 - La St Francis Dam, costruita nel 1928 nel boom precedente alla Grande Depressione

Questo trend comincia ad invertirsi a partire dalla prima metà del Novecento (Figura 72) e si acuisce sempre di più, al punto tale che nel decennio 2000-2010 il picco di costruzione di nuove dighe è individuabile nella classe di altezza massima[83]. Si tratta in ogni caso di oscillazioni molto ridotte in termini assoluti (il range estremo difficilmente supera i due o tre punti percentuali), ma che se confrontate con loro aiutano a fotografare un fenomeno altrimenti celato dall'apparente omogeneità dei dati. Naturalmente, la spiegazione più attendibile è di carattere tecnico-economico, in quanto il progredire della tecnologia (in parallelo al passare del tempo) consente da un lato di progettare in maniera più ambiziosa, dall'altro induce un aumento dei bisogni della popolazione che deve essere accompagnato da una crescita delle potenzialità d'invaso.

[83]Lempérière, «The role of dams in the XXI century Achieving a sustainable development target»

3.1.28 Correlazione Volume di Invaso-Anno di Costruzione



	0-10^1	10^1-10^2	10^2-10^3	10^3-10^4	10^4-10^5	10^5-10^6	10^6-10^7	10^7-10^8	10^8-10^9	>10^9
>2010	5.66%	1.36%	1.67%	2.10%	2.81%	3.93%	3.94%	3.30%	0.00%	0.00%
2000-2010	5.66%	5.80%	4.81%	5.34%	5.45%	6.34%	6.64%	4.40%	0.00%	0.00%
1990-2000	9.91%	9.41%	7.91%	9.30%	9.40%	8.74%	9.35%	10.44%	0.00%	0.00%
1980-1990	12.26%	11.01%	12.47%	14.36%	15.43%	15.55%	14.51%	18.13%	11.11%	0.00%
1970-1980	19.34%	14.39%	33.03%	27.52%	24.08%	20.76%	22.14%	22.53%	11.11%	0.00%
1960-1970	14.15%	15.10%	19.44%	18.48%	17.57%	19.45%	16.97%	14.84%	33.33%	0.00%
1950-1960	15.09%	9.65%	11.90%	11.04%	11.55%	10.78%	12.18%	8.24%	11.11%	0.00%
1925-1950	7.08%	12.37%	4.35%	6.07%	7.53%	8.34%	7.63%	12.64%	0.00%	0.00%
1900-1925	4.25%	10.66%	2.03%	3.35%	3.72%	4.15%	5.04%	5.49%	33.33%	0.00%
1850-1900	3.30%	2.66%	0.98%	1.40%	1.33%	1.38%	1.48%	0.00%	0.00%	0.00%
1800-1850	1.42%	1.18%	0.31%	0.24%	0.22%	0.22%	0.12%	0.00%	0.00%	0.00%
1700-1800	0.47%	2.78%	0.40%	0.35%	0.47%	0.18%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
0-1700	1.42%	3.61%	0.70%	0.46%	0.44%	0.18%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Figura 73 - Correlazione Volume di Invaso-Anno di Costruzione

La correlazione tra capacità di invaso e anno di costruzione conferma la tesi secondo cui la prima rimane invariante quasi del tutto nei confronti dei periodi temporali (Figura 73). Infatti, al di là di alcune prevedibili deviazioni statistiche (da imputare alla scarsità di dati riguardo al volume di bacino, rispetto ad altri parametri), non vi è una significativa variazione di distribuzione all'interno dei diversi range di capacità. È comunque doveroso sottolineare come la regolarità registrata al punto precedente sia maggiore di quella che si può notare dall'analisi grafica della presenta correlazione: infatti, in questo caso sarebbe più corretto parlare di una notevole analogia nella suddivisione in classi, ma con differenze dell'ordine anche del 5/10% (contro i pochi punto percentuali massimi trovati in ambito di altezza). Tale fenomeno dovrebbe essere connesso alla maggiore variabilità intrinseca di un dato come il volume, in cui la variazione tra un record e l'altro appare naturalmente meno scandita della distribuzione delle altezze. Inoltre, la gestione di un bacino di ampie dimensioni può risultare tecnologicamente più complessa rispetto a quella di un

bacino di elevata altezza, in quanto il secondo richiede unicamente tecniche costruttive efficaci (e spesso già note dall'ambito civile-urbanistico), mentre grandi volumi in gioco impongono precauzioni sia a livello costruttivo che, successivamente, di controllo e sicurezza[84]. Da ciò consegue una dipendenza più pronunciata dal progresso ingegneristico.

[84] Biswas, «Impacts of Large Dams: Issues, Opportunities and Constraints»

3.2 Piccole dighe

3.2.1 Introduzione generale

La definizione di Small Dam (piccola diga) appare non unanime a livello mondiale, complice il fatto di essere tendenzialmente complementare a quella di Large Dam (grande diga) approfonditamente discussa all'inizio del capitolo precedente. In realtà, spesso non è possibile individuare uno spartiacque netto tra le due categorie, in quanto sarebbe impensabile stabilire un parametro univoco (dall'altezza alla capacità di invaso, passando per la tipologia costruttiva o la funzionalità richiesta) che sancisca la distinzione tra due comportamenti, strutturali e non soltanto, sensibilmente diversi tra loro. Spesso infatti la discriminante è costituita da un insieme intercorrelato dei parametri sopra indicati (la cui lista si configura in ogni caso come non esaustiva), senza contare che è possibile, e anzi assolutamente probabile, che alcune dighe possano appartenere contemporaneamente ad entrambe le categorie[85]. Molto spesso, tenuto conto di questi limiti, si è soliti definire le due categorie sulla base di un limite prefissato di altezza (tendenzialmente 15 metri) e prevedere eventualmente alcune eccezioni; ad esempio, ICOLD, che tratta unicamente le grandi dighe (non a caso LD sta per Large Dams), inserisce nella propria banca dati tutti gli invasi con altezza maggiore o uguale a 15 metri, a prescindere da altre caratteristiche; ICOLD non trascura tuttavia gli invasi comunque superiori ai 10 metri che si distinguono per caratteristiche comparabili a quelle delle grandi dighe "standard", principalmente ampiezza del bacino ma anche, ad esempio, la potenza annuale prodotta se in presenza di un impianto idroelettrico[86].

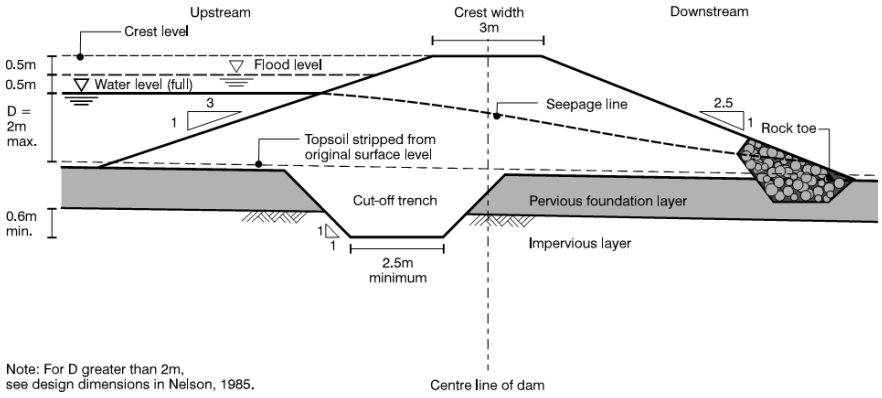


Figure 2. Section through a small earth dam (Source: Nelson, 1985)

Figura 74 - Sezione di esempio di una piccola diga

Naturalmente, le piccole dighe sono caratterizzate, in linea di massima, da tipologie costruttive più codificate e tradizionali (Figura 74): conseguenza inevitabile è l'interesse minore che viene loro dedicato in ambito scientifico, malgrado una densità notevolmente maggiore rispetto alle grandi dighe. Questa lacuna diventerà chiara durante la presentazione dell'unico database internazionale che raccolga un numero sufficientemente robusto di record di invasi inferiori ai 15 metri (l'unica discriminante presa in considerazione nell'ambito della presente analisi), ovvero NPDP: circa il 90% della banca dati è costituito da piccole dighe all'interno dei confini USA (più di 55000 invasi documentati), una quota che può ritenersi vicina alla realtà, mentre le informazioni sugli altri Paesi appaiono largamente insufficienti e per di più sottomesse a logiche socio-politiche.

[85] Bureau of Reclamation, «Small Dams Design»
[86] ICOLD, «Guide to the World Register of Dams »

3.2.2 Distribuzione per Stato

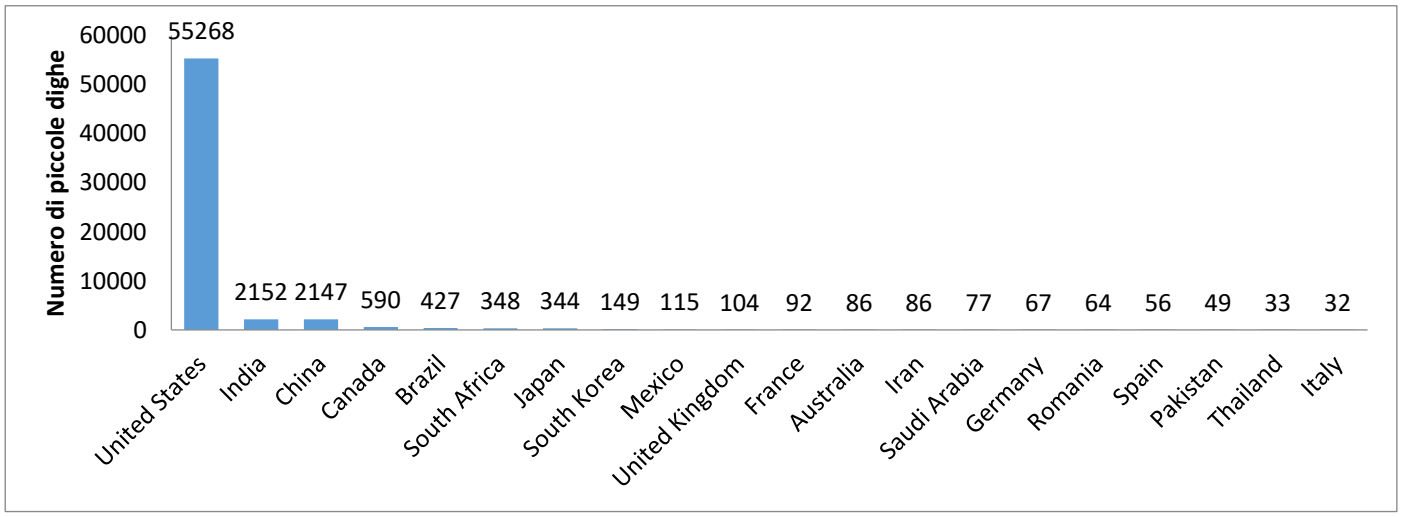


Figura 75 - Distribuzione per i primi 20 Stati delle piccole dighe NPDP

Vista la centralità dei record relativi agli Stati Uniti nel database NPDP (che si ricorda essere frutto del lavoro accademico della Stamford, nonché sovvenzionato direttamente da fonti governative statunitensi), non deve sorprendere la numerosità delle voci di piccole dighe localizzate negli USA, che naturalmente non sono rappresentative a livello relativo rispetto al resto del mondo (Figura 75); è invece realistico ipotizzare che le 55268 piccole dighe raccolte nel database vadano effettivamente ad individuare la totalità della popolazione nazionale (un dato che quindi potrebbe tornare utile per tarare i dati NPDP).[87] Ai fini di questa analisi risulta comunque conveniente visualizzare lo stesso istogramma depurato della colonna statunitense, per favorire il confronto grafico su dati che al contrario dovrebbero essere decisamente inferiori rispetto alla reale presenza di piccole dighe, ma potenzialmente affidabile come campione rappresentativo.

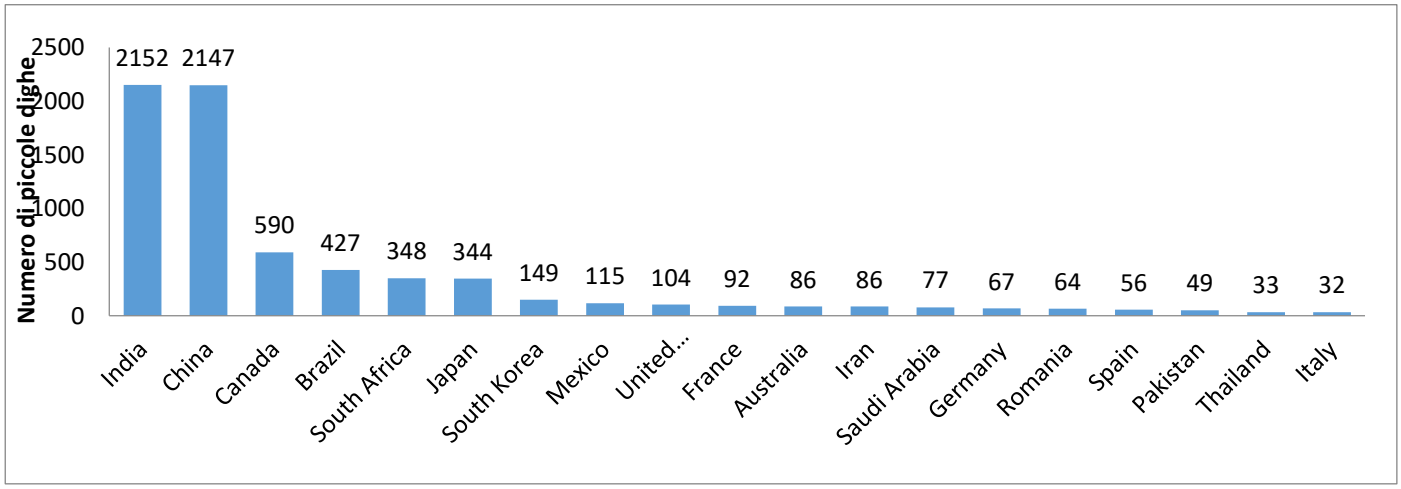


Figura 76 - Distribuzione per i primi Stati (escluso USA) del numero di piccole dighe NPDP

Da questa rappresentazione filtrate dei dati USA (Figura 76) si nota subito come a dominare siano le due potenze emergenti asiatiche, ovvero la Cina e l'India; la preponderanza di piccole dighe a

[87] Martin W. McCann, «National Performance of Dams Program An Archive of Dam Information and Experience»

loro associata si può spiegare con la fame di energia e l'esigenza di alimentare coltivazioni e industrie su larga scala, a fronte di un progresso tecnologico che (meno per la Cina, più per l'India) non consente ancora di privilegiare gli invasi maggiori[88]. A seguire il Canada (Figura 77), uno dei leader mondiali nello sfruttamento delle fonti idroelettriche, che supera di qualche centinaio di record Brasile, Sudafrica e Giappone, già presenti tra i Paesi che si distinguono per la forte diffusione di grandi dighe; di conseguenza si tratta del naturale completamento di una popolazione piuttosto omogenea tra grandi e piccole dighe.

Figura 77 - Small Dam (British Columbia, Canada) dedicata all'idroelettrico

Lo stesso dicasi per Corea del Sud e Stati Europei tradizionalmente votati alla costruzione di invasi, quali Francia, Regno Unito, Spagna e Italia; si tratta di realtà all'avanguardia che possono realizzare senza problemi invasi di altezza superiore ai 15 metri, ma che necessitano anche di dighe minori per completare la rete di accumulo e distribuzione, senza contare la loro estensione territoriale contenuta (se confrontata con i Paesi citati in precedenza) che impone una razionalizzazione generalizzata delle opere idrauliche. Il Messico invece ripone fiducia negli invasi di piccole dimensioni per far fronte ai rischi di siccità connaturati alla sua natura principalmente desertica. I dati che invece sorprendono parzialmente sono quelli di Iran e Arabia Saudita, tendenzialmente poco noti sul panorama internazionale in questo ambito. Per i primi bisogna tenere in conto le recenti politiche di industrializzazione (e addirittura di nuclearizzazione)[89] che richiedono grandi disponibilità idriche; per l'Arabia Saudita invece, notoriamente poco incline all'idroelettrico visto le immense riserve petrolifere, si tratta di necessità di irrigazione a sostegno degli investimenti nel settore primario per aumentare la superficie coltivabile di un Paese a maggioranza desertico.

[88] Magee, «Dams in East Asia: Controlling Water but Creating Problems»
[89] Kebede Kassa, «Iran's Nuclear Program»

3.2.3 Distribuzione per Tipologia

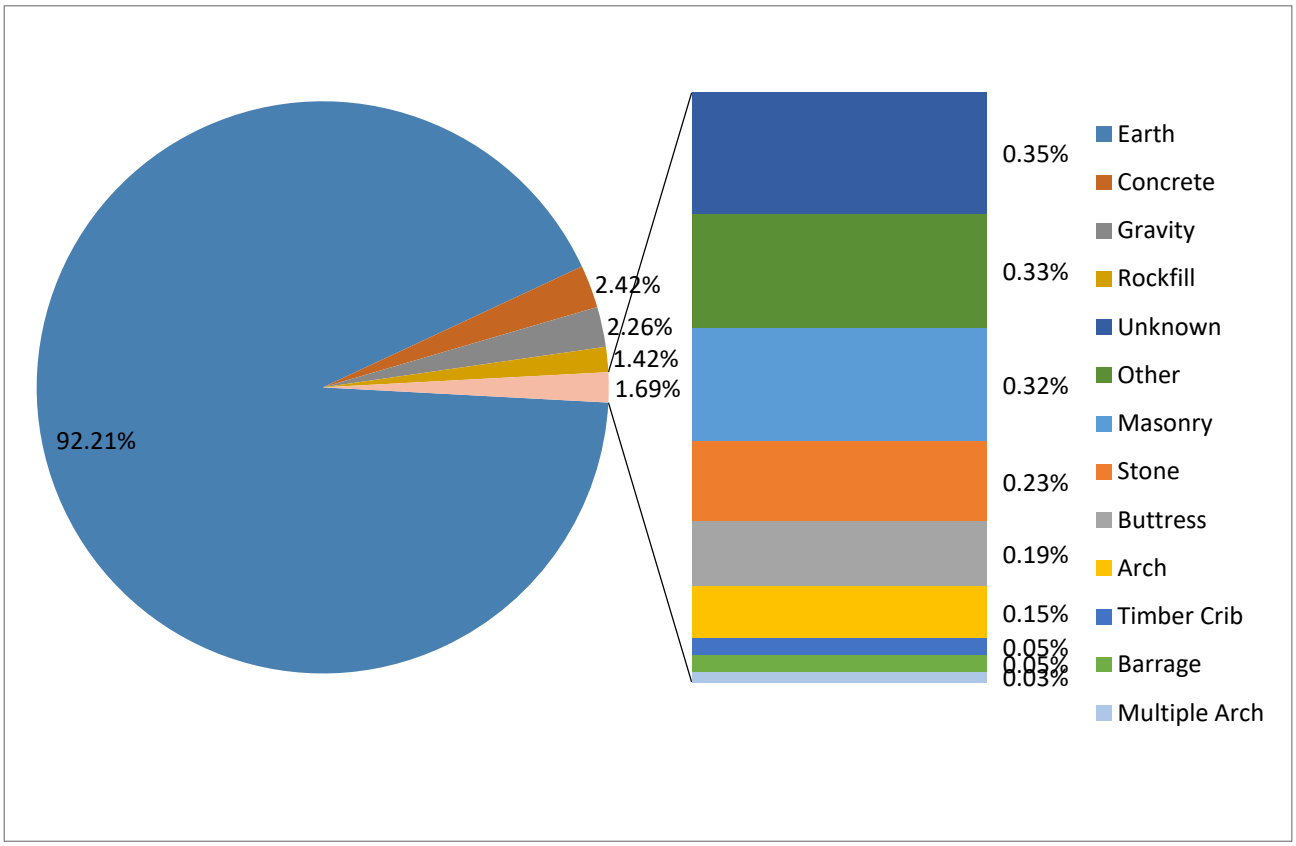


Figura 78 - Distribuzione per Tipologia Primaria delle piccole dighe NPDP

La suddivisione su base tipologica (Figura 78) conferma un'aspettativa molto ragionevole, ovvero che, trattandosi unicamente di invasi con altezza inferiore ai 15 metri, si registra una netta preponderanza di dighe in terra, perfino maggiore di quella già di per sé significativa in ambito di grandi dighe (più di 9 impianti su 10). Da un lato l'altezza limitata rende difficoltosa la realizzazione di determinate tipologie che richiedono uno sviluppo verticale non trascurabile (ad esempio le dighe ad arco, sia singolo che multiplo); dall'altra questo tipo di bacini vengono appositamente concepiti per svolgere compiti di accumulo e redistribuzione su scala locale, spesso potendo contare su fondi limitati, da qui la predilezione per la tipologia in terra che, soprattutto per altezze contenute, offre un buon compromesso costi-benefici[90]. Naturalmente, va sempre tenuto conto della forte deviazione statistica potenziale indotta dalla proporzione disomogenea tra dighe statunitensi e resto del mondo. Al netto di questa precauzione, le tipologie più quotate immediatamente successive, nonché le uniche a mantenersi al di sopra della quota del 0,5%, sono nell'ordine:

- Dighe in cemento armato: meno impiegato rispetto alle grandi dighe, visto che il CLS si rende particolarmente performante in presenza di strutture in elevazione, per le quali può assicurare contemporaneamente leggerezza e solidità[91]. Si ritaglia comunque uno spazio non indifferente anche per le piccole dighe, in quanto meno sensibile a problemi di sifonamento e filtrazione, pur se a fronte di costi più sostenuti

[90] https://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/agdex4613
[91] Japan Society of Civil Engineers, «Dam Concrete» (2007)

- Dighe a gravità: come la precedente si parla di una percentuale dell'ordine del 2%, comunque tra le più significative. L'impiego meno diffuso rispetto alle grandi dighe, oltre che per le ragioni generali già esplicitate, si spiega con la propria natura strutturale; in esse infatti il peso della diga diventa stabilizzante nel bilancio delle forze e contribuisce ad aumentare il fattore di sicurezza dell'invaso. Con altezze inferiori (e di conseguenza volumi più piccoli, da cui il peso minore), l'entità dell'azione a favore di sicurezza si assottiglia e le rende meno efficaci[92]
- Dighe in roccia: tale tipologia esige la disponibilità in loco o comunque di facile accessibilità in termine di materiale di origine rocciosa caratterizzato da buona qualità, condizione che non sempre si verifica nelle realtà territoriali che fanno largo uso di piccole dighe; inoltre, la concorrenza di materiale granulare a buon mercato è notevole, senza che un paramento in roccia compatta assicuri un miglioramento sostanziale della sicurezza (ad esempio nei confronti della compattazione o delle deformazioni in fondazione)[93]

Tutte le altre tipologie si evidenziano per una quota davvero irrisoria, che va dallo 0,33% per le dighe di tipologia varia ad un pressoché nullo 0,03% per le dighe ad arco multiplo (se si esclude naturalmente il dato delle dighe la cui configurazione non è nota, le quali occupano appena il 0,35% della popolazione totale, sintomo comunque di una notevole precisione nella cura del database NPDP in questo settore). Per queste ultime in particolare appare evidente l'incompatibilità quasi totale con le dimensioni imposte nella categorizzazione tra piccole e grandi dighe; discorso analogo per le dighe a speroni e ad arco singolo, che possono acquistare senso unicamente in presenza di invasi ad ampio sviluppo planimetrico, per cui offrirebbero un'adeguata stabilità alle forze orizzontali, sufficiente ad aumentare la loro convenienza rispetto alle dighe in terra. Una tipologia singolare che ovviamente non si è rintracciabile nell'analisi delle grandi dighe è quella definita come "timber", ovvero eseguita tramite sovrapposizione di assi di legno (ovviamente trattato industrialmente per renderlo impermeabile e compatto, vedasi Figura 79); si tratta di un'alternativa ormai in disuso e relegata più che altro alle zone ad alta disponibilità di legname rispetto a cemento e terra, ma comunque poco indicata per garantire soglie accettabili di sicurezza. [94]

Figura 79 - Redrigde Dam (Canada), una diga in legno crollata in seguito ad un'alluvione

[92] Bureau of Reclamation USA, «Design of Gravity Dams»
[93] Wilson, Squier, «Earth and Rockfill Dams».
[94] EU Life Program «Timber Dams Factsheet»

3.2.4 Distribuzione per Classe di Rischio

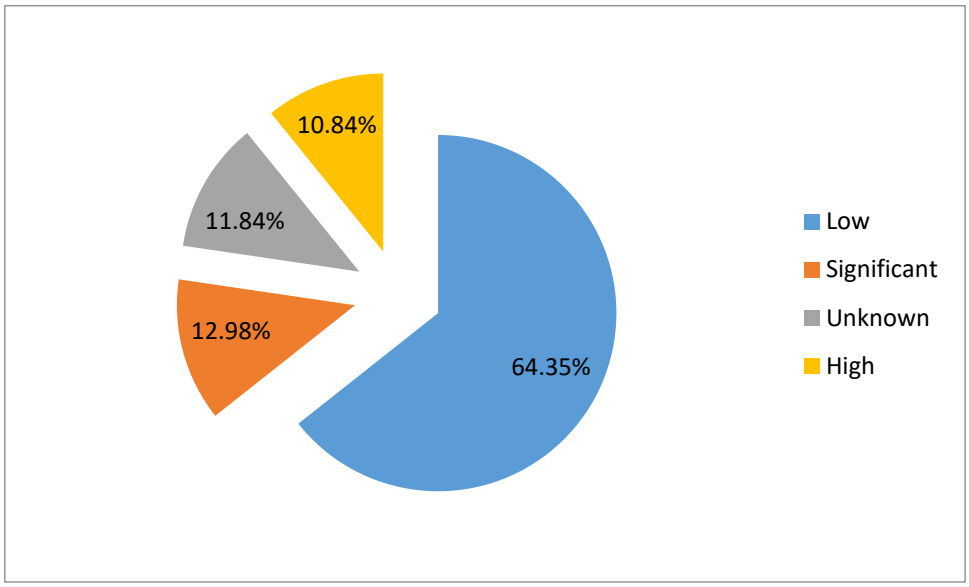


Figura 80 - Distribuzione percentuale per Classe di Rischio delle piccole dighe NPDP

Prima di analizzare questa distribuzione, è doveroso illustrare come si articola la suddivisione in base alla "Hazard Class" per le dighe e gli sbarramenti (Figura 80). In primo luogo, si tratta di un parametro che dà un giudizio qualitativo sul danno potenziale a valle dell'opera in esame, nel caso quest'ultima andasse incontro ad un crollo catastrofico. Contrariamente a quello che si può immaginare, tale parametro non prendere assolutamente in considerazione la sua integrità strutturale, né il suo stato operativo oppure la capacità di invaso[95]. Le categorie in cui può differenziarsi questo ragionamento sono tendenzialmente tre:

- Low Hazard Dams: non si prevedono vittime; è possibile attendersi un leggero aumento dei livelli idrici nei corsi d'acqua limitrofi e danni fortemente limitati ad infrastrutture e edifici a valle. In alcune classificazioni viene denominata anche "Class A", soprattutto in ambito statunitense (NCRS)
- Significant Hazard Dams: l'incidente potrebbe più realisticamente indurre perdite umane; inoltre, non si trascura l'interazione tra gli effetti di piena e infrastrutture o edifici, per quanto il numero di abitazioni coinvolte non può superare il numero di 2 e gli sfollati il numero di 6. Prendono la denominazione di "Class B" per il NCRS
- High Hazard Dams: è altamente probabile che si registrino vittime ed estesi danneggiamenti alle proprietà, oltre all'allagamento generalizzato non soltanto delle strade locali a ridosso dei fiumi (Figura 81), ma anche di autostrade e altre vie di collegamento strategiche. È classificabile anche come "Class C".

[95] FEMA, « Federal Guidelines for Dam Safety: Hazard Potential Classification»

Figura 81 - Allagamento in seguito al crollo di una small timber dam (Washington, USA)

Ad esse, s'intende, si aggiungono le dighe che per ragioni di segretezza industriale, oppure per mancanza di dati, non presentano una classificazione univoca e certa; pertanto, compare una quota non trascurabile di invasi nella categoria "Unknown", più di uno su dieci per la precisione. Il restante 90% è occupato in massima parte dalle dighe a basso rischio, per circa i due terzi del totale. La percentuale di dighe a medio e alto rischio tende invece ad equivalersi (tra l'11 e il 12% della popolazione complessiva), a sottolineare il fatto che, una volta appurata la possibilità di danni a valle (quindi escludendo la classe di rischio più bassa), non è così semplice stabilire una soglia netta tra le altre due: questo perché la stima delle conseguenze di un crollo richiedono strumenti di analisi approfonditi e capacità predittivi adeguate.

3.2.5 Distribuzione per Funzione

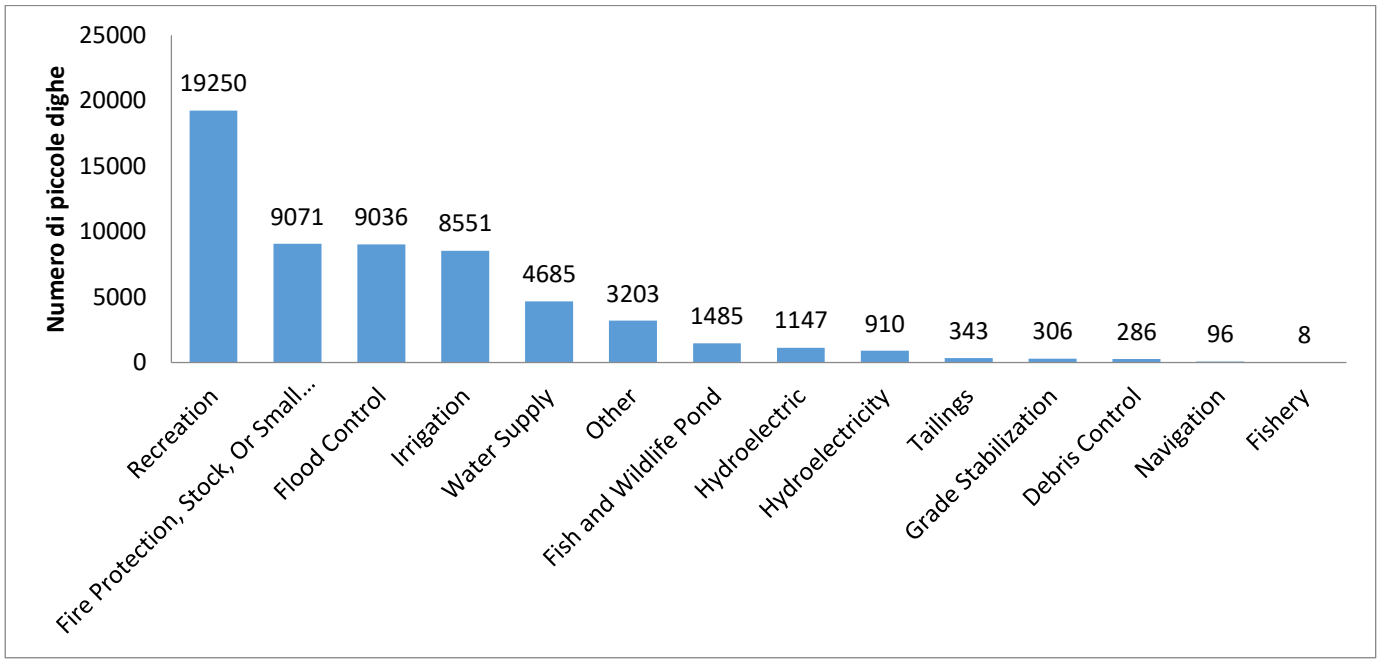


Figura 82 - Distribuzione per Funzione delle piccole dighe NPDP

Rispetto alla classificazione ICOLD, le funzioni previste dal database NPDP sono più ampie (Figura 82): vengono introdotti scopi quali la sicurezza antincendi (Fire protection), la protezione dai detriti (Debris Control), lo stoccaggio di materiale minerario (tailings) e il rinforzo di pendii (grade stabilization). Questa maggiore differenziazione è imputabile sia ad un riguardo maggiore

dedicato all'analisi delle funzioni di ogni impianto, sia al fatto che nella categoria delle piccole dighe ricadono anche impianti decisamente piccoli, costruiti al fine di espletare compiti singolari e slegati dai classici processi industriali o agricoli. Si notano inoltre dei doppioni funzionali, in particolare "Hydroelectric" e "Hydroelectricity", ma anche "Fish and Wildlife Pond" e "Fishery" (per quanto in questo caso rimanga una sottile differenza di fondo, ma dato il numero davvero contenuto di record per quest'ultimo, si è ritenuto accettabile unire le due suddivisioni). Una volta ottimizzato in tal senso il database, si perviene ad una rappresentazione più sintetica:

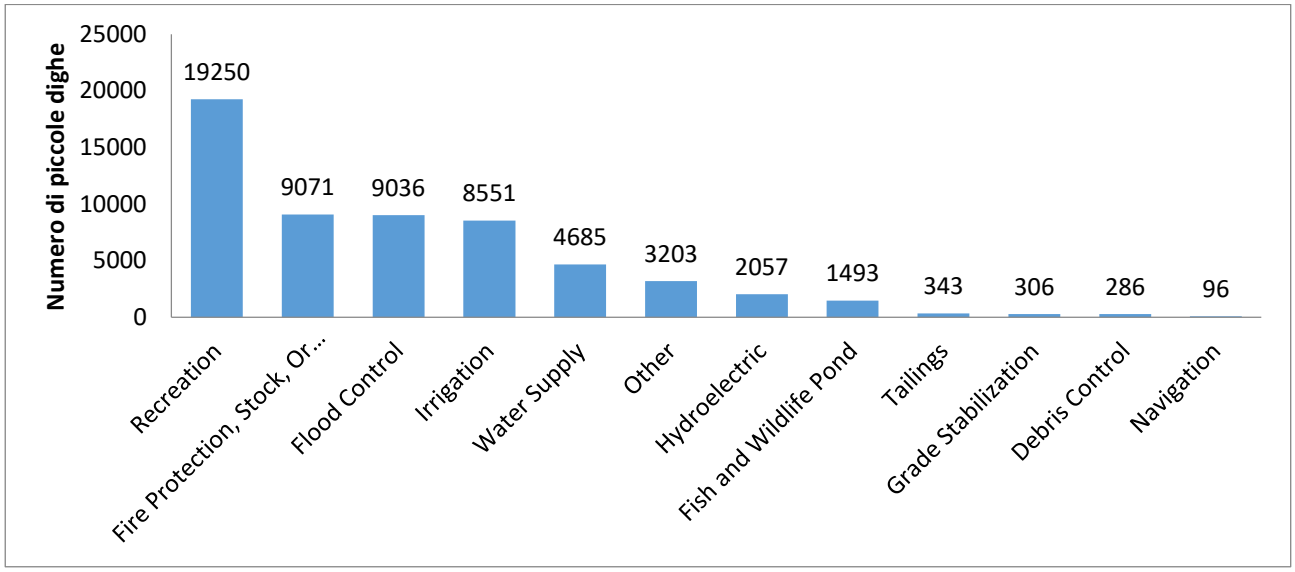


Figura 83 - Distribuzione (razionalizzata) per Funzione delle piccole dighe NPDP

A partire da quest'ultima visualizzazione, si nota immediatamente la quota molto ampia riservata a funzione ricreative, già previste per le grandi dighe ma con numeri decisamente inferiori (Figura 83); è infatti più consono adibire i piccoli bacini ad attività ludiche, piuttosto che coinvolgere invasi maggiori (anche per una questione di costi e di impatto ambientali, che sarebbero ingiustificati per attività non di pubblica utilità)[96]. Si contendono la seconda posizione il controllo delle piene, che conserva la preponderanza relativa delle grandi dighe, e la protezione dagli incendi, al contrario peculiare del database NPDP; quest'ultima in particolare riveste un ruolo di spicco normalmente non assegnabile agli invasi di grandi dimensioni, in quanto il quantitativo d'acqua necessario resta relativamente contenuto, mentre si tende a privilegiare l'accessibilità del bacino e la sua sicurezza per evitare che possa collassare proprio in condizioni di emergenza, quando la sua funzione diventa cruciale. La quota associata all'irrigazione e all'accumulo di acqua per impieghi civili continua ad occupare un posto di rilievo, soprattutto, in questo caso, per appezzamenti di terreno e centri abitati più piccoli; esiste infatti un rapporto di proporzionalità tra la domanda d'acqua e l'altezza dell'invaso (a sua volta correlata più o meno direttamente alla capacità in termini volumetrici), rendendo tali scopi ugualmente importanti sia per le grandi che per le piccole dighe[97]. Lo stesso non si può dire dell'idroelettrico, che appare fortemente ridimensionato nell'analisi limitata alle dighe minori: i quantitativi di acqua in gioco sono spesso insufficienti a giustificare la spesa per l'installazione di turbine e sistemi capaci di trasformare un flusso notoriamente inferiore in energia. L'ultima funzione dalla presenza non trascurabile è quella legata alla pesca e alla tutela di fauna e flora, che giustamente si adatta bene in bacini di modesta ampiezza. Gli scopi rimanenti faticano a

[96]Duda-Gromada, «USE OF RIVER RESERVOIRS FOR TOURISM AND RECREATION»
[97] Lire Ersado, «Small-scale irrigation dams, agricultural production, and health»

coprire complessivamente un migliaio di record, e in alcuni casi si presentano come davvero modesti: è il caso della navigazione, già di per sé poco connessa all'ambito degli sbarramenti e per di più limitata dall'altezza sotto i 15 metri dei bacini. Appaiono quantomeno interessanti gli utilizzi delle piccole dighe al fine di offrire supporto alla lotta contro il dissesto idrogeologico: la stabilizzazione di frane e il contenimento di detriti. Si tratta di piccoli accorgimenti che consentono di realizzare interventi anche notevoli a fronte di uno spazio di ingombro tutto sommato limitato ed un'architettura essenziale (Figura 84). In particolare, i bacini di stabilizzazione sono costituiti da un paramento subverticale costruito a ridosso di una parete di terreno, nell'ottica di smaltire attraverso una tubazione filtrata parte dell'acqua interstiziale fino a portare il livello di falda al di sotto di un determinato livello di sicurezza; in questo modo si minimizzano i rischi di fenomeni erosivi, offrendo contemporaneamente un'area di potenziale salvaguardia della fauna acquatica[98].

Figura 84 - Opera di invaso per la stabilizzazione di un pendio

A completamento dell'analisi, si trova una percentuale piuttosto bassa di bacini minerari, che in teoria non sarebbero oggetto del presente studio, poiché spesso non sono riempiti di acqua, bensì di materiale industriale e/o minerario (sali metallici, acidi, scorie o rifiuti) con differente comportamento reologico; si è comunque deciso di integrarli nell'analisi comparativa visto il loro impatto limitato sul totale dei casi e l'interesse che potrebbero all'interno delle distribuzioni incrociate[99].

[98]NHCP & NRCS, «NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE»
[99] Kossof, Dubbin, Alfredsson et al. «Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation»

3.2.6 Distribuzione per Altezza

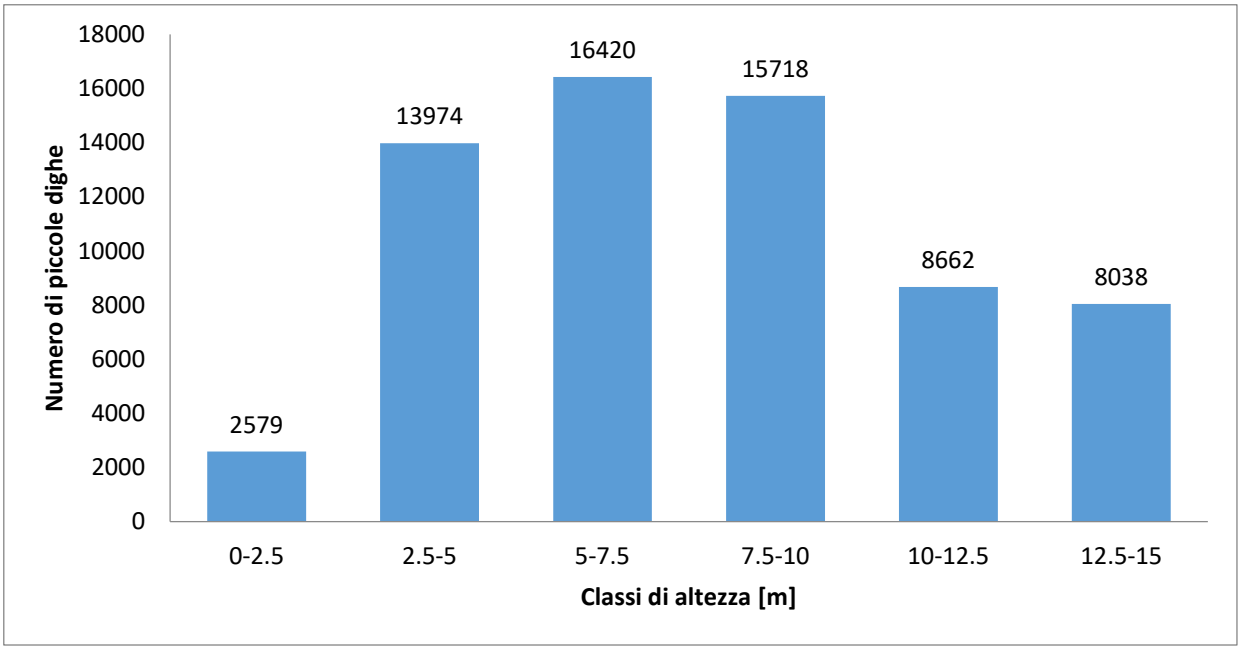


Figura 85 - Distribuzione per Classi di Altezza delle piccole dighe NPDP

Se si applica una suddivisione della distribuzione in altezza regolare e scandita, si ottiene un andamento caratterizzato da un picco in corrispondenza della classe 5-7.5, che risulta abbastanza appiattito visto che la classe successiva (7.5-10) presenta un numero di record analogo a quella massima (Figura 85). Una volta superato il punto di culmine dell'andamento, si registra in un primo momento un calo piuttosto drastico che porta il numero di piccole dighe quasi a dimezzarsi al passaggio alla classe 5, per poi stabilizzarsi e diventare quasi costante con la classe più alta (12.5-15) che eguaglia quasi perfettamente la precedente. Anche la classe 2 non di discosta troppo da quella centrale di picco, con una differenza contenuta entro il 20%; discorso diverso invece per la suddivisione più piccola, che andando a raccogliere le dighe avente altezza inferiore a 2.5 metri soffre sia di problemi statistici di registrazione dei dati (spesso questo tipo di invasi non è documentato), sia di criticità strutturali, di fattibilità e di convenienza economica (Figura 86).

Figura 86 - Una timber dam dall'altezza inferiore ai 2 metri (Wisconsin, USA), uno dei pochi esempi artificiali al di sotto dei 2.5 m

A meno infatti di disporre di un'estensione planimetrica notevole, una diga di queste dimensioni presenterebbe un impatto talmente localizzato da non giustificare la spesa per la propria costruzione, restando relegata al massimo all'ambito privato. Se si tenta di correlare questa

distribuzione a quella delle grandi dighe (operazione che verrà svolta in maniera più minuziosa all'interno del capitolo successivo), si nota fin da subito come l'andamento monotono crescente del numero di dighe con il diminuire dell'altezza non si arresti ad un'altezza di 15 metri (la soglia di sbarramento tra grandi e piccole dighe adottata nell'ambito del presente studio), bensì aumenti almeno fino ai 6/7 metri. Tale fenomeno appare già più aderente alla realtà rispetto a quello che si registrerebbe analizzando il database ICOLD nel suo complesso (che si ricorda ospitare anche alcune piccole dighe di altezza superiore ai 10 metri e invaso maggiore di un milione di metri cubi), il quale si mostrerebbe come una curva fortemente decrescente nel range 0-15, che dovrebbe al contrario restare quello dotato della maggiore popolazione in termine di invasi[100]. Estendendo l'analisi al database NPDP (pur con tutti i suoi limiti, uno su tutti la preponderante centralità degli Stati Uniti tra i record) si ottiene una distribuzione realistica fino al picco, con una naturale sottostima per valori di altezza ancora inferiori (la crescita dovrebbe trasferirsi almeno alla classe successiva, per poi diminuire soltanto in corrispondenza dei valori di altezza estremamente bassi, oltre i quali la definizione stessa di diga potrebbe venire meno).

3.2.7 Distribuzione per Volume di Invaso

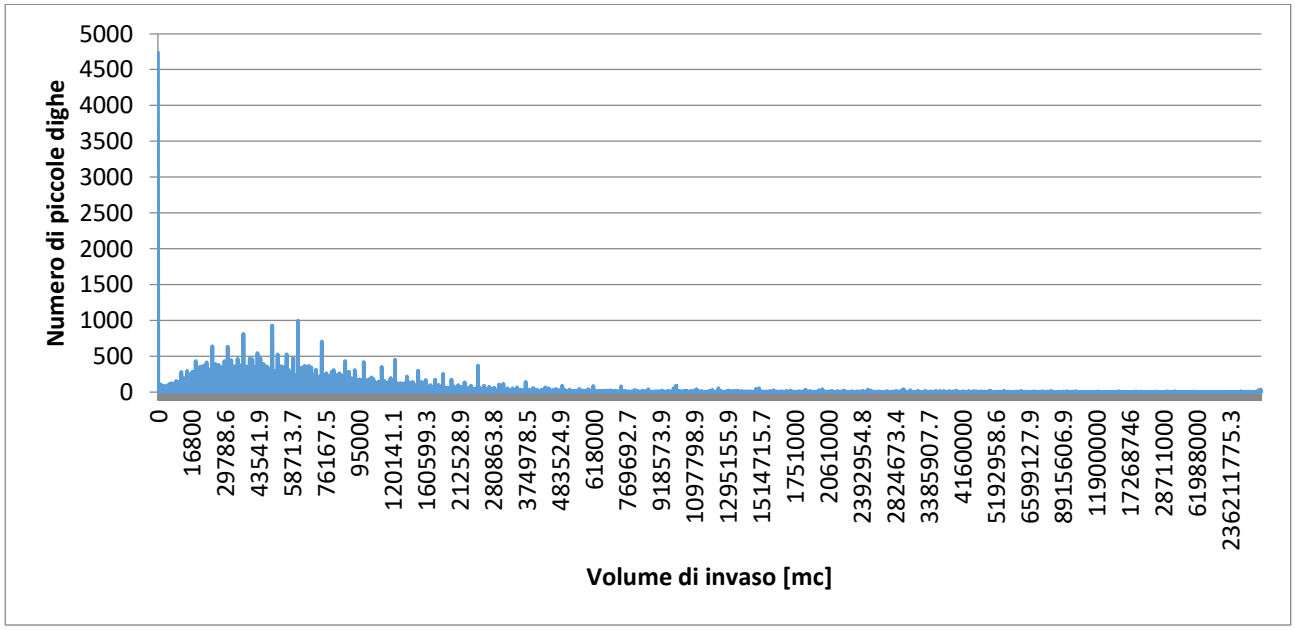


Figura 87 - Distribuzione per Volume di Invaso delle piccole dighe NPDP

La distribuzione sopra indicata viene mostrata unicamente a titolo di anticipazione di alcune considerazioni che verranno espresse in seguito per migliorare lo studio statistico del volume di invaso, vista la scarsa resa grafica che questo tipi di visualizzazione offre (Figura 87). È comunque doveroso sottolineare come, all'interno di una distribuzione che dovrebbe essere fortemente dispersa e poco discretizzata su determinati valori, vi siano dei picchi localizzati che emergono nettamente dall'andamento medio, per di più associati a entità volumetriche apparentemente non significative dal punto di vista numerico (es: 1233,5 mc oppure 2467 mc); tale anomalia può spiegarsi con l'accorpamento di più record sotto lo stesso valore di capacità di invaso, sia per approssimazioni di registrazione che per la difficoltà di accesso ad alcuni dati. Inoltre, si è notato come tali picchi siano posizionati ad intervalli fissi, in quanto, ad esempio, 2467 rappresenta

[100] ICOLD, «Small Dams, Design, Surveillance and Rehabilitation»

esattamente il doppio di 1233,5, che a sua volta è un terzo del valore di volume su cui si innesta il picco successivo, ovvero 3700,4; ciò suggerirebbe una qualche relazione a monte, che potrebbe essere celata dall'impiego, almeno in fase preliminare, di unità di misura anglosassoni per le quali tali valori risultano fortemente arrotondati. Vi è inoltre una preponderanza di valori nulli per cui non è chiaro se si tratti di record associati ad un valore volumetrico prossimo effettivamente allo zero oppure alla mancanza di dati; il confronto di questi record con la rispettiva altezza, talvolta superiore ai 10 metri, genera perplessità riguardo all'interpretazione del dato. Inoltre, ricerche puntuali su determinati invasi hanno generato risultati discordanti, considerando che si presentavano sia situazioni in cui i volumi erano piuttosto bassi, sia altri in cui l'entità era decisamente maggiore. Si è quindi deciso di non considerare nell'analisi successiva i record caratterizzati dal valore 0 di invaso, come se si trattasse di voci non determinate. Vengono quindi escluse dalla seguente categorizzazione (Tabella 8):

	Limite inferiore [mc]	Limite superiore [mc]
Classe 1	0	10
Classe 2	10	100
Classe 3	100	1000
Classe 4	1000	10000
Classe 5	10000	100000
Classe 6	100000	1000000
Classe 7	1000000	10000000
Classe 8	10000000	100000000
Classe 9	100000000	1000000000
Classe 10	1000000000	10000000000
Classe 11	10000000000	1E+11
Classe 12	1E+11	1E+12

Tabella 8 - Suddivisione in Classi del Volume di Invaso per le piccole dighe

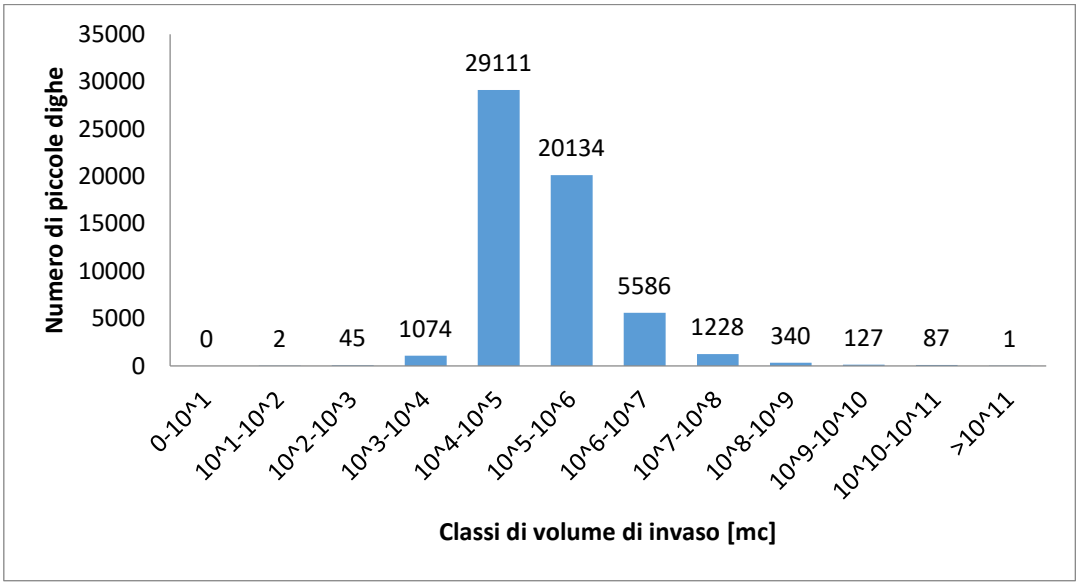


Figura 88 - Distribuzione per Classi di Volume di Invaso delle piccole dighe

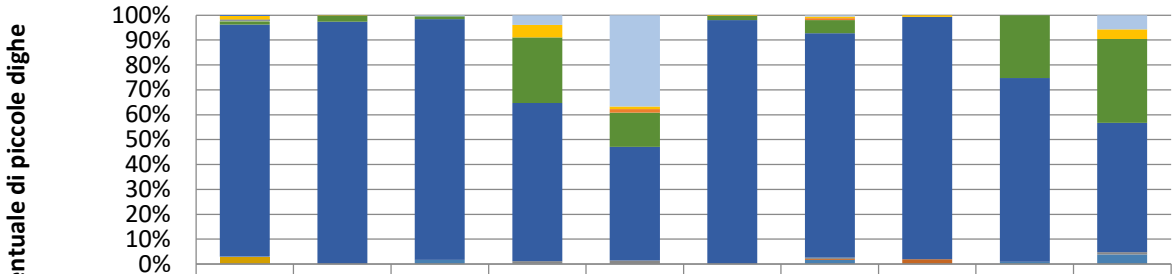
Una volta riservate le precauzioni sottolineate in precedenza e applicata la sottoclassificazione per potenze di dieci, si ottiene un andamento con un picco intorno alla Classe 5, come da attese e in correlazione con l'analisi delle altezze svolta nel paragrafo precedente; la differenza sostanziale con quest'ultima riguarda tuttavia la dispersione dei dati intorno alla media, che in questo caso appare molto più contenuta (Figura 88). E' infatti in primo luogo molto complicato e poco utile realizzare invasi con volumi contenuti come quelli delle prime due classi; da questo punto di vista, l'attendibilità dei valori si dimostra migliore di quella del database ICOLD in corrispondenza dei valori più bassi di volume (sotto i 100 metri cubi), che a maggior ragione dovrebbero risultare ancora meno frequenti nel campo delle grandi dighe, ma che invece, per evidenti errori di registrazione, presentano una preponderanza non trascurabile. All'altro estremo della distribuzione, trattandosi di invasi con un'altezza massima di 15 metri, non avrebbe senso ingegneristico spingere la capacità di invaso su livelli così elevati come quelli delle classi più alte, cosa che richiederebbe tra l'altro uno sforzo tecnologico non indifferente e esporrebbe ad un rischio ingiustificatamente elevato l'area a valle (in quanto il rischio è naturalmente correlato alla quantità di acqua che potrebbe potenzialmente liberarsi in caso di crollo). Sempre in linea con le aspettative invece sono le classi con la frequenza più elevata, ovvero quelle che consentono di ottimizzare il rapporto tra altezza utile e disponibilità di invaso, il quale è sì dipendente in parte dallo sviluppo verticale dell'opera, ma comunque subordinato alle caratteristiche geo-morfologiche del sito[101]. Una capacità oscillante tra i 10 000 e i 1 000 000 di metri cubi consente in ogni caso di assicurare i quantitativi volumetrici adeguati per svolgere efficacemente tutte le funzioni analizzate nel relativo paragrafo, senza richiedere soluzioni strutturali scarsamente compatibili con la natura di piccola diga. Analogamente (in parte) alla distribuzione sulle altezze, la curva ideale sembra salire rapidamente a partire dalle classi inferiori per poi scendere più dolcemente con l'aumentare della capacità di invaso (segno che vi è una popolazione più diffusa tra le classi medio-alte), per quanto in questo caso il picco sia nettamente interno alla Classe 5 (10 000 – 100 000 mc). Infine, si è provveduto a verificare un dato che sembrava discostarsi notevolmente dalla media, ovvero l'unico record situato nella Classe 12, quindi teoricamente caratterizzato da una capacità di invaso superiore ai 100 miliardi di metri cubi, a fronte di un'altezza di 15 metri esatti; a seguito di una ricerca di approfondimento svolto nel database di HydroQuébec (la società governativa della provincia autonoma del Québec deputata alla gestione del patrimonio idroelettrico nazionale), tale dato sorprendente è stato confermato ma in corrispondenza di un'altra diga, effettivamente denominato Manic-5 (facente parte di un complesso denominato Daniel-Johnson, di cui l'invaso in esame rappresenta invece un bacino secondario, Figura 89) dalle dimensioni e caratteristiche ben diverse (200 metri di altezza e modalità di costruzione ad arco)[102]. Questo errore notevole di attribuzione getta un'ombra di dubbio anche sui record delle Classi 10 e 11, fortunatamente dall'occorrenza relativa molto limitata.

[101] NPDP, «Design and Construction of Dams»
[102] http://www.hydroquebec.com/visit/cote_nord/manic-5.html

Figura 89 - Manic-5, una diga ad arco di altezza superiore ai 200 metri, erroneamente confusa con un invaso accessorio in terra di altezza pari a 15 metri

Nell'ottica di minimizzare i rischi di errori concatenanti a partire da dati di dubbia attendibilità, si è deciso di considerare, d'ora in poi e ai fini esclusivamente della presente analisi, unicamente le Classi 4-8, le uniche sicuramente compatibili con le dimensioni in altezza di una piccola diga e che soprattutto offrono una popolazione relativa significativa sul totale.

3.2.8 Correlazione Stato-Tipologia



	United States	India	China	Canada	Brazil	Japan	South Africa	South Korea	Mexico	United Kingdom
Unknown	0.00%	0.00%	0.41%	3.90%	36.77%	0.00%	0.58%	0.00%	0.00%	5.77%
Timber Crib	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Stone	0.26%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Rockfill	1.38%	0.14%	0.00%	5.08%	0.94%	0.29%	0.58%	0.67%	0.00%	3.85%
Other	0.37%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Multiple Arch	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	1.41%	0.00%	0.88%	0.00%	0.00%	0.00%
Masonry	0.37%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Gravity	1.40%	2.56%	1.14%	26.27%	13.82%	1.74%	5.26%	0.00%	25.23%	33.65%
Earth	93.20%	97.30%	96.73%	63.56%	45.67%	97.97%	90.06%	97.32%	73.87%	51.92%
Concrete	2.74%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Buttress	0.16%	0.00%	0.00%	0.85%	1.41%	0.00%	0.58%	0.00%	0.00%	0.96%
Barrage	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.29%	2.01%	0.00%	0.00%
Arch	0.07%	0.00%	1.72%	0.34%	0.00%	0.00%	1.75%	0.00%	0.90%	3.85%

Figura 90 - Correlazione Stati-Tipologia delle piccole dighe

La distribuzione relativa dei primi dieci Stati per popolazione di piccole dighe conferma l'andamento medio che privilegia nettamente la tipologia in terra, particolarmente adatta a gestire altezze contenute e bacini non troppo ampi (Figura 90). Essa infatti si mantiene al di sopra del 90% in USA, India, Cina, Giappone, Corea del Sud e Sudafrica, rendendo la distribuzione delle tipologie restanti abbastanza trascurabile dal punto di vista del confronto; l'unico dato da sottolineare è la diffusione comunque sostenuta di piccole dighe ad arco in Cina e Sudafrica (poco meno del 2% del totale contro valori pressoché nulli per gli altri Paesi), avvalorata dalla necessità per queste due realtà territoriali di accumulare ampie riserve idriche anche in spazi ristretti, unita ad una capacità tecnologica comunque non indifferente[103]. Tale esigenza viene confermata, almeno nell'ambito del Paese più meridionale del continente africano dall'occorrenza relativa notevole registrata per le dighe a gravità, notoriamente introdotte in presenza di invasi ad elevata volumetria, per la loro capacità di ridurre l'impatto della spinta idrostatica andandola a scaricare in fondazione col supporto del peso notevole del paramento. Focalizzandosi poi sugli Stati che presentano peculiarità in termine di distribuzione, quest'ultima è manifestata principalmente attraverso un aumento dell'incidenza delle dighe a gravità, che può arrivare anche intorno al 30% per Canada e Regno Unito; insieme al Brasile e al Messico, si tratta di Paesi che riservano un interesse particolare alla produzione di energia idroelettrica, il cui impianto tipico fa fatica ad adattarsi ad un invaso in terra, sia per ragioni di compatibilità tecnologica che, soprattutto, di sicurezza. Va fatto emergere inoltre il dato di un 3% circa della popolazione inglese di piccole dighe che viene realizzato secondo la tecnica Rockfill, sintomo della larga disponibilità di materiale compatto di origine rocciosa sul territorio britannico; discorso simile per il Canada e gli Stati Uniti, due Paesi che si contraddistinguono per la grande disponibilità di risorse minerarie e cave di pietra da costruzione. Infine, malgrado una disponibilità diffusa di informazioni sulla tipologia strutturale, il Brasile presenta più di un terzo dei piccoli invasi locali che sono di tipologia sconosciuta, probabilmente per la natura del territorio brasiliano, avente un'estensione molto ampia e occupata in gran parte dalla Foresta Amazzonica, con conseguenti difficoltà di comunicazione in particolar modo per le dighe minori (Figura 91)[104].

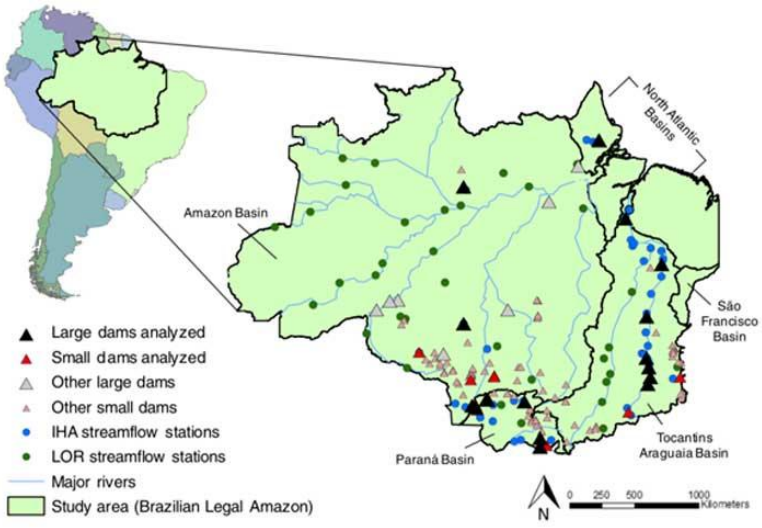
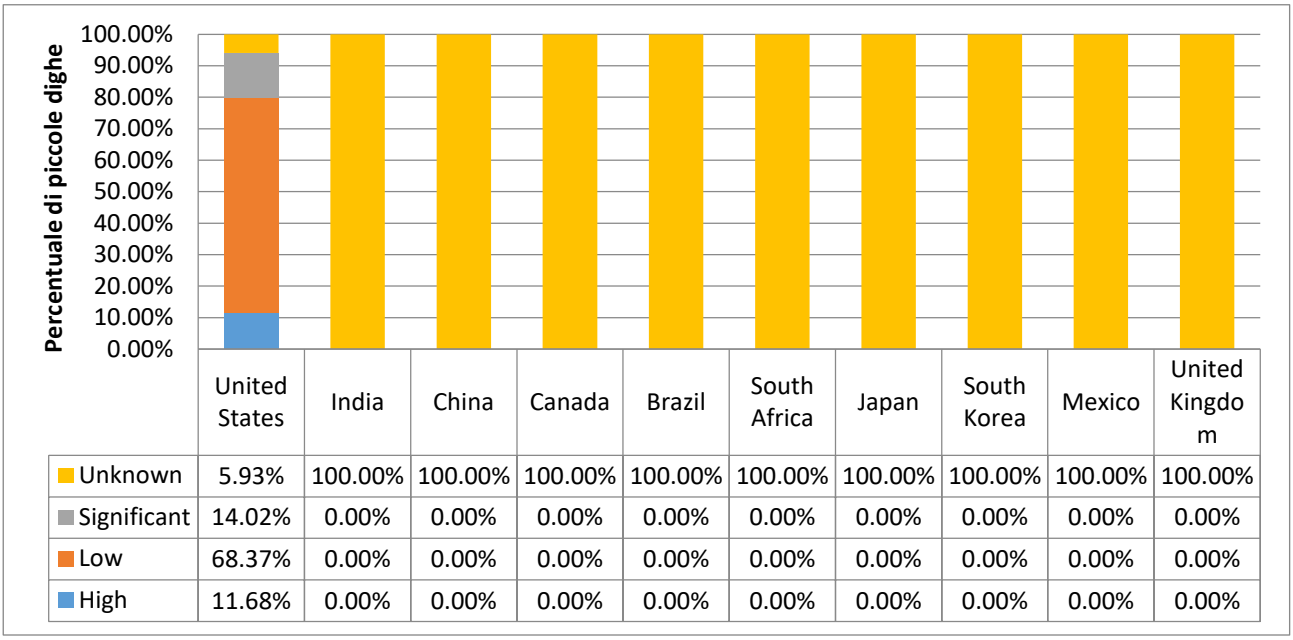


Figura 91 - Un progetto dell'Università della Florida per la mappatura del patrimonio di dighe dell'Amazzonia

[103] Kuun, «The construction of Dam sto ensure water security in South Africa»
[104] Da Costa, «Sustainable Dam Development in Brazil»

3.2.9 Correlazione Stato–Classe di rischio



	United States	India	China	Canada	Brazil	South Africa	Japan	South Korea	Mexico	United Kingdom
Unknown	5.93%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
Significant	14.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Low	68.37%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
High	11.68%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

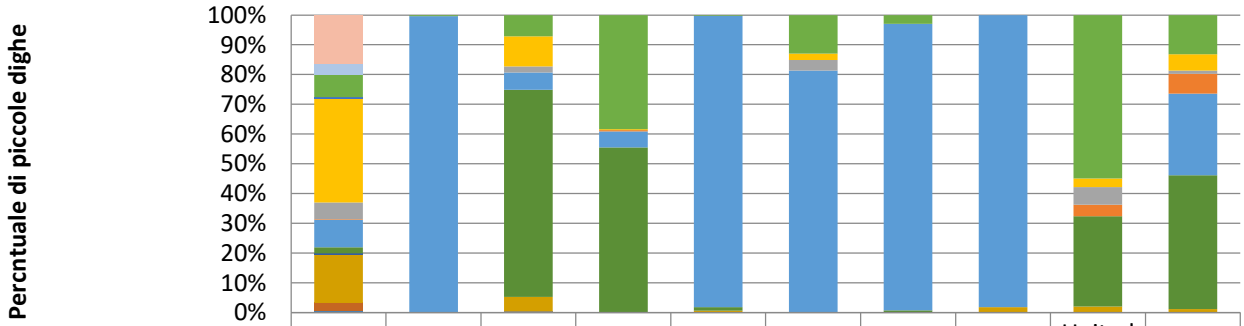
Figura 92 - Correlazione Stati-Classe di Rischio per le piccole dighe

Il dato che emerge è emblematico di quanto specificato in precedenza, ovvero che la classificazione di Rischio è una strategia impiegata unicamente (almeno nella formulazione fornita) sul territorio statunitense; di conseguenza, le correlazioni statistiche tra questa variabile e le altre potranno applicarsi unicamente agli USA (Figura 92). Per quanto si tratti di una limitazione notevole e alla base di un risultato che non potrà considerarsi rappresentativo a livello mondiale, si è comunque scelto di studiarne le ricadute statistiche in quanto la Classe di Rischio è un parametro che si presta bene ad introdurre le problematiche relative agli incidenti, i quali rappresentano il fulcro del presente studio. Si dovrà in ogni caso tenere conto dell'inevitabile deviazione statistica che un'approssimazione del genere potrebbe generare. A questo proposito, si evidenzia come quello raffigurato in questo paragrafo sia il dato reale sulla distribuzione interna della Classe di Rischio, da ritenersi maggiormente corretto di quello rappresentato nella sezione apposita, in quanto in quel caso, almeno a livello percentuale, la quota di classificazione sconosciuta risultava gonfiata a causa di tutti i record al di fuori degli Stati Uniti. E' comunque giusto chiarire che, a causa della netta preponderanza di piccole dighe statunitensi all'interno del database NPDP, i rapporti si mantengono pressoché inalterati e la gerarchia di rischio potenziale continua a lasciare il primo posto per distacco alle dighe caratterizzate da un "Low Hazard" (poco più dei due terzi del totale, mentre prima si trattava del 64%), a seguire molto ravvicinate tra loro le popolazioni di dighe "Significant Hazard" e "High Hazard" (Figura 93), con una leggera prevalenza delle prime[105].

[105] FEMA, « Federal Guidelines for Dam Safety: Hazard Potential Classification»

Figura 93 - Danni da una High Hazard Dam collassata (Hawaii, USA)

3.2.10 Correlazioni Stato–Funzione



	United States	India	Canada	Brazil	Japan	South Africa	South Korea	Mexico	United Kingdom	France
Fire Protection	16.50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Unknown	3.42%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Water Supply	7.66%	0.42%	7.13%	38.41%	0.29%	13.02%	2.92%	0.00%	54.90%	13.19%
Tailings	0.62%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Recreation	34.84%	0.00%	10.19%	0.23%	0.00%	2.07%	0.00%	0.00%	2.94%	5.49%
Other	5.63%	0.00%	2.04%	0.00%	0.00%	3.55%	0.00%	0.00%	5.88%	1.10%
Navigation	0.14%	0.00%	0.00%	0.47%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	3.92%	6.59%
Irrigation	9.27%	99.48%	5.77%	5.39%	97.97%	81.36%	96.35%	98.23%	0.00%	27.47%
Hydroelectric	2.09%	0.09%	69.61%	55.50%	1.16%	0.00%	0.73%	0.00%	30.39%	45.05%
Grade Stabilization	0.56%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Flood Control	16.08%	0.00%	4.92%	0.00%	0.58%	0.00%	0.00%	1.77%	1.96%	1.10%
Fishery	0.00%	0.00%	0.34%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Fish and Wildlife Pond	2.70%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Debris Control	0.52%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Figura 94 - Correlazione Stati-Funzione per le piccole dighe

Si ricorda che d'ora in poi verrà considerato sufficiente robusto, dal punto di vista statistico, unicamente il dato relativo agli Stati Uniti, in quanto il numero limitato di record del resto del mondo, per di più distribuito su circa un centinaio di Paesi, può dare origine a distribuzioni relative fortemente influenzate dalle poche dighe documentate (Figura 94). Ne sono un esempio Giappone,

Corea del Sud, Sudafrica, India e Messico, che sembrano dedicare tutte circa il 90% del proprio patrimonio nazionale di invasi all'irrigazione. Se questa situazione potrebbe rivelarsi vagamente accettabile per Stati aridi come gli ultimi due, viene difficile immaginarsi due nazioni all'avanguardia come le due asiatiche che non superano l'1% di quota di idroelettrico e hanno un impatto pressoché nullo sul controllo delle piene e sulle altre attività connesse alla salvaguardia della sicurezza pubblica[106]. Si tratta sicuramente di uno dei limiti più volte evidenziati per un database che si focalizza quasi esclusivamente sulla realtà statunitense e raccoglie poche migliaia di record complessivi per gli altri Paesi, magari avendo accesso unicamente a banche dati settoriali (in questo caso dall'ambito agricolo, ad esempio). Andando invece sulle realtà che presentano maggiore uniformità di distribuzione, viene confermata la vocazione alla produzione idroelettrica da parte di Canada e Brasile, due colossi mondiali del settore, ma anche in Francia e Regno Unito, che presentano una lunga tradizione di impianti di conversione del flusso idrico in corrente elettrica (non a caso, sono tra i pionieri di questa forma di energia)[107]«». Le altre attività dalla diffusione non trascurabile sono generalmente l'irrigazione e l'accumulo di riserve idriche per la redistribuzione in ambito civile e industriale. Infatti, i piccoli invasi possono rivelarsi ideali per alimentare centri cittadini o industriali di dimensioni contenute; a sostegno di questa considerazione si può notare che nel Regno Unito, un Paese caratterizzato da una miriade di piccoli abitati intorno alle grandi metropoli, la quota di piccole dighe classificata come "Water Supply" si attesta oltre il 50% del totale. In misura minore, ma sempre ad avvalorare la tesi, emergono i dati di Francia e Canada; quest'ultimo poi è l'unico degli Stati in esame, ad eccezione degli USA che verranno indagati nel dettaglio a breve, a dedicare una parte della propria popolazione di piccole dighe al controllo delle piene. Ciò non deve stupire visto che si tratta di un Paese dal clima continentale caratterizzato da notevoli escursioni termiche, che comportano precipitazioni improvvise e intense; inoltre, l'alta densità di depositi glaciali induce rischi di piena legati allo scioglimento primaverile[108]. Contrariamente alla media del database (che si ricorda essere fortemente dipendente dalla situazione statunitense), il dato sulla quota riservata agli scopri ricreativi resta stabilmente al di sotto del 10%. Soffermandosi invece sul dato più significativo dal punto di vista statistico, ovvero gli Stati Uniti, si trova un'ampia quota riservata alla Ricreazione, segno che gli USA tendono a sfruttare piuttosto i grandi bacini per scopi industriali, conservando invece il carattere locale per le dighe minori. A seguire c'è un 20% di controllo delle piene, uno scopo che si adatta bene anche a bacini di dimensioni contenute, come anche i successivi "Water Supply" e "Irrigation", in quanto sul territorio americano, oltre ai grandi latifondi, esiste tutta una serie di piccoli appezzamenti di terreno che possono essere alimentati da bacini di altezza inferiore ai 15 metri, nonché centri abitati dalla richiesta idrica assai limitata. Le dighe di cui manca l'informazione sulla funzionalità non superano il 5%, segno che malgrado i problemi più volte trattati di deviazione statistica del database, la cura dei dati è molto elevata; a proposito di questo, si nota come non vi siano record ignoti in questo campo per gli altri Stati ad elevata popolazione di dighe, segno del fatto che la cernita di impianti analizzati al di fuori dei confini statunitensi dovrebbe basarsi soprattutto sull'accessibilità dei dati (e questo potrebbe spiegare il numero di voci molto contenuto, visto che non risulterebbero accettate le dighe di cui non si possiede una documentazione pressoché completa). Gli scopi che in ambito statunitense risultano trascurati, se non addirittura non pervenuti, sono i seguenti:

[106] Guillaume Hennequin «Hydro, Tide and Waves Energy in Japan»
[107] Lubek, Wakeford «The future of Hydroelectric in France»
[108] Shilts, Blake «Rivers of Ice - Canada's Glaciers»

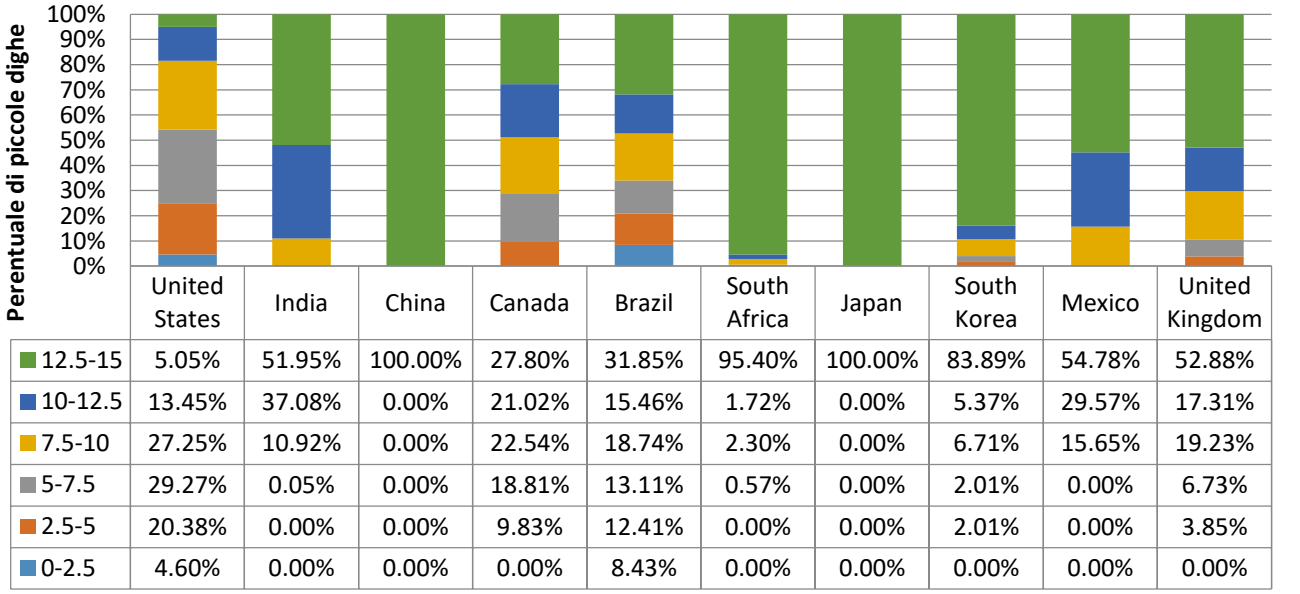
- Navigation (a causa della naturale difficoltà a realizzare impianti di navigazione con altezza inferiore ai 15 metri, vedasi Figura 95)

Figura 95 - La diga di Bonneville (Oregon, USA), adibita alla navigazione, con un'altezza di circa 50 metri

- Grade stabilization
- Debris control

In particolare gli ultimi due attestano una certa trascuratezza da parte degli USA nella gestione del rischio di dissesto idrogeologico; si tratta di un fenomeno che non caratterizza unicamente l'ambito delle dighe, al contrario costituisce un problema annoso comunque oggetto di un progressivo aumento di interesse[109]. Infine, non stupisce la quota molto limitata assegnata alla produzione di energia idroelettrica, in quanto la disponibilità di ampi dislivelli e il territorio sterminato degli USA consente di realizzare impianti ben maggiori di 15 metri andando ad ottimizzare il rendimento degli stessi.

3.2.11 Correlazione Stato–Altezza



	United States	India	China	Canada	Brazil	South Africa	Japan	South Korea	Mexico	United Kingdom
12.5-15	5.05%	51.95%	100.00%	27.80%	31.85%	95.40%	100.00%	83.89%	54.78%	52.88%
10-12.5	13.45%	37.08%	0.00%	21.02%	15.46%	1.72%	0.00%	5.37%	29.57%	17.31%
7.5-10	27.25%	10.92%	0.00%	22.54%	18.74%	2.30%	0.00%	6.71%	15.65%	19.23%
5-7.5	29.27%	0.05%	0.00%	18.81%	13.11%	0.57%	0.00%	2.01%	0.00%	6.73%
2.5-5	20.38%	0.00%	0.00%	9.83%	12.41%	0.00%	0.00%	2.01%	0.00%	3.85%
0-2.5	4.60%	0.00%	0.00%	0.00%	8.43%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Figura 96 - Correlazione Stati-Altezza per le piccole dighe

[109] Watterstein, Thorne, «Debris Control at Hydraulic Structures in Selected Areas of the United States and Europe»

Il grafico sopra riportato risulta fortemente emblematico dei limiti del database NPDP: in maniera ovviamente scorretta, per Cina e Giappone tutte le piccole dighe vengono classificate nella fascia più alta; approfondendo il dettaglio dell'analisi, emerge come non solo tutti i record ricadano in questa suddivisione, ma addirittura siano concentrati in massa in corrispondenza dell'altezza di 15 metri (Figura 96). Si tratta nuovamente di scelte di registrazione da parte del NPDP, che, non disponendo delle risorse necessarie a sondare l'intero patrimonio mondiale di piccole dighe, ha scelto di concentrarsi su determinati invasi, le cui caratteristiche possono variare a seconda dello Stato[110]. Per le due potenze asiatiche, ad esempio, la decisione è stata quella di focalizzarsi unicamente sulle grandi dighe (quindi aventi un'altezza minima di 15 metri), mentre per altri Paesi geograficamente o diplomaticamente più prossimi agli Stati Uniti, la ricerca si infittisce fornendo, al netto dei dati comunque limitati, uno spaccato più esaustivo della popolazione locale di piccoli invasi. E' il caso ad esempio del Canada, da sempre un grande partner degli USA nell'ambito della produzione di energia idroelettrica e di conseguenza nella gestione delle risorse idriche (si ricorda che Stati Uniti e Canada condividono sui rispettivi confini alcuni dei Grandi Laghi e le Cascate del Niagara, soltanto per portare alcuni esempi eclatanti, vedasi Figura 97)[111].

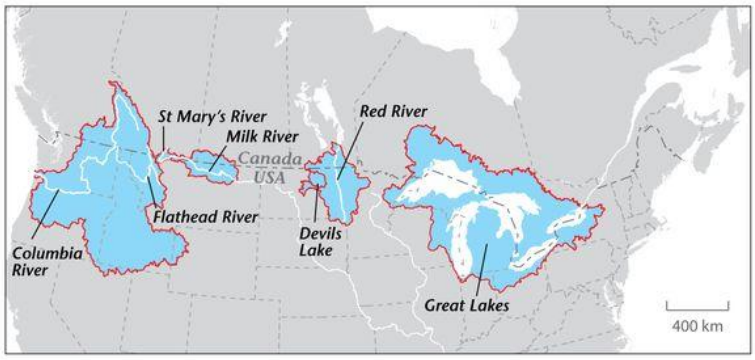


Figura 97 - Estensione dei bacini idrici dei Grandi Laghi attraverso il confine USA-Canada

Ne consegue una fotografia piuttosto accurata della distribuzione canadese delle piccole dighe, tra l'altro abbastanza omogenea tra le varie categorie, pur tendente naturalmente alle altezze tra i 7.5 e i 15 metri; l'unica suddivisione che non ospita record è quella più bassa, ma visti gli spazi incontaminati di cui dispone il Paese, si tratterebbe di impianti non ottimali rispetto alle potenzialità locali. Sudafrica e Corea del Sud soffrono di un problema analogo a quello di Cina e Giappone, pur presentando una popolazione limitata anche nelle fasce più basse, tendenzialmente distribuita equamente (cosa che non assicura un'effettiva omogeneità nella costruzione delle piccole dighe, ma soltanto che l'analisi NPDP si è concentrata allo stesso modo sugli invasi di altezza compresa tra gli 0 e 10 metri). Messico e Regno Unito si distinguono per una suddivisione interna che tende sempre a privilegiare le dighe di altezza prossima ai 15 metri, ma le classi 7.5-10 e 10-12.5 si prendono una quota non trascurabile; in questo caso potrebbe trattarsi effettivamente di una scelta tecnica dei due Stati, per aumentare le capacità di invaso a fronte di un modesto impegno del territorio. Analogamente al Canada, anche il Brasile si evidenzia come un Paese per cui il database NPDP ha nutrito un forte interesse relativo, al punto tale da risultare l'unica realtà esterna agli USA a

[110] NPDP, «Introduction to NPDP Database»
[111] Doug Vine, «INTERCONNECTED: CANADIAN AND U.S. ELECTRICITY»

evidenziare una quota, tra l'altro assolutamente non indifferente, di bacini molto bassi (classe 1, inferiore ai 2,5 metri); date le caratteristiche geografiche del Paese, occupato in gran parte dal bacino del Rio delle Amazzoni e dai suoi affluenti e principalmente pianeggiante, si tratta di una conseguenza piuttosto inevitabile[112]. E' possibile immaginare che si tratti di invasi realizzati direttamente lungo il corso dei fiumi, per regimarli e sfruttarne le potenzialità idriche. Anche il resto delle classi si presenta decisamente omogeneo, anche per merito dell'adeguata disponibilità di dati che vanno a fotografare l'intero territorio, limitando le deviazioni statistiche. Infine, il dato USA che risulta intrinsecamente attendibile rispetta naturalmente in maniera più accurata l'andamento medio mondiale del database NPDP (in quanto, come sarebbe più corretto affermare, è quest'ultimo a dipendere fortemente dalla situazione statunitense): risulta comunque molto influente anche la classe 5-7.5, che arriva addirittura a superare la fascia di picco del 7.5-10; per il resto, la distribuzione appare molto omogenea, situazione prevedibile in un territorio federale come quello degli Stati Uniti, in cui eventuali concentrazioni locali in termini di altezza vengono appianate sulla media nazionale.

[112] Anderson, Jenkins, Heilpern et al. «Fragmentation of Andes-to-Amazon connectivity by hydropower dams»

3.3 Assemblaggio database unificato tra Grandi Dighe e Piccole Dighe

3.3.1 Problemi di fondo

La presenza di due database separati pone fin da subito un interrogativo a proposito della reale possibilità di costituirne uno unico che raccolga le dighe di ogni altezza. Questa operazione appare fin da subito ambiziosa, a causa della natura profondamente diversa delle due banche dati. Partendo dai problemi minori, si sottolinea come alcuni parametri caratteristici di ogni database non siano presenti nell'altro e viceversa, obbligando, in assenza di un approfondimento tramite altre fonti che risulterebbe inutilmente complesso e comunque fortemente limitato, a tralasciare alcuni fattori che altrimenti tenderebbero ad apparire unicamente sulle grandi oppure sulle piccole dighe, con conseguenti problemi di bias. A seguire, ci si scontra con una diversa suddivisione tipologica per determinati criteri, quali ad esempio la tipologia strutturale oppure la categorizzazione funzionale; questo dettaglio implica un'operazione di uniformazione, per la quale è tuttavia necessario domandarsi se sia il caso di ricondurre direttamente la suddivisione di un database a quella dell'altro senza apportare alcuna modifica (e quindi con il rischio di forzature notevoli per accomunare più parametri sotto uno già esistente e codificato), oppure più realisticamente imporre una terza classificazione, frutto della sintesi di quelle impiegate nei rispettivi database. Se queste criticità possono essere risolte, almeno in parte, attraverso procedure di confronto e ottimizzazione, lo stesso non si può dire per il grande problema statistico che coinvolge, oltretutto, uno soltanto dei due database e che potrebbe generare errori deviazioni statistiche assolutamente non trascurabili: la banca dati NPDP, come già analizzato nel capitolo precedente, dedica interesse particolare alle sole piccole dighe statunitensi, con una popolazione (da ritenersi esaustiva per gli USA) che a livello relativo occupa circa il 90% del database. Per gli altri Paesi, gli invasi che hanno meritato di essere inseriti in NPDP non seguono per di più criteri associabili direttamente ad un unico parametro (che potrebbe essere ad esempio l'ampiezza del bacino, in maniera analoga a quanto avviene per ICOLD[113]), bensì diversificati sulla base della disponibilità di informazione e dei canali di comunicazione che NPDP ha stabilito con le altre realtà territoriali extranazionali. La semplice fusione dei due database darebbe origine ad una situazione piuttosto singolare:

- Le grandi dighe (quindi aventi dimensioni superiori ai 15 metri, senza ulteriori limitazioni su altre basi) deriverebbero interamente dal database ICOLD, che si distingue per la maggiore eterogeneità di origine dei record, peraltro suffragata da ricerche incrociate (in parte già evidenziate all'interno del capitolo sulle Grandi Dighe). E' quindi lecito attendersi che la fotografia che emerge dalla ricerca ICOLD sia pressoché esaustiva della popolazione mondiale di Large Dams, soprattutto considerando che, generalmente, le normative nazionali impongono una registrazione obbligatoria per tutti gli invasi di grandi dimensioni, pertanto l'accesso ai dati dovrebbe essere privo di deviazioni troppo pronunciate[114]. Inoltre, ICOLD può contare su diverse agenzie locali che rispondono direttamente al Comitato Internazionale (ANCOLD e JCOLD, tanto per portare due esempi citati precedentemente nel presente studio, associati rispettivamente all'Australia, Figura 98, e al Giappone), grazie alle quali si può assumere una generalizzata affidabilità delle informazioni raccolte.

[113] ICOLD, «Guide to the World Register of Dams »
[114]ICOLD, «87th Annual Meeting JUNE 9-14, 2019 — OTTAWA, CANADA INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS»

Figura 98 - Il simbolo di ANCOLD, distaccamento Australiano di ICOLD

Il problema più volte evidenziato di ICOLD resta comunque l'interesse piuttosto limitato riservato alle Small Dams, al punto tale da registrare unicamente le dighe al di sopra dei 10 metri (e inferiori ai 15, s'intende) che presentino un bacino superiore al milione di metri cubi. Il confronto con il database NPDP, alla ricerca di una possibile taratura reciproca, dovrà quindi forzatamente passare attraverso questa piccola quantità di dati potenzialmente in comune. Vista la robustezza interna della banca dati ICOLD, l'obiettivo è quello di utilizzare quest'ultima per calibrare le modifiche sul database NPDP (sfruttando l'unico dato realistico su entrambe, ovvero quello relativo agli USA) e ottenere un database complessivo sufficientemente solido dal punto di vista statistico[115]

- Le Piccole Dighe andrebbero estratte interamente dal database NPDP, che da un lato si distingue per l'assenza di distinguo dal punto di vista strutturale (niente limitazioni sulla base dell'altezza o del volume di invaso), dall'altro presenta l'annoso problema di una preponderanza pressoché totale di casi situati negli Stati Uniti, e una dipendenza per quelli stranieri dalla reperibilità dei dati. Non è quindi sicuro nemmeno assumere che le voci extra-USA siano in qualche modo proporzionali alla reale popolazione di dighe, in quanto questa informazione potrebbe essere sottomessa a scelte di carattere diplomatico o comunque slegate da un'effettiva analisi statistica[116]. Si tenterà comunque, con le dovute approssimazioni, di rimodulare tale banca dati per garantire la possibilità di una comparazione adeguata con il database ICOLD e, ove possibile, la costituzione di un database unico, atto alla correlazione con il database degli incidenti prodotto nell'ambito del presente studio e illustrato nei prossimi capitoli.

Una volta accennati i limiti che un'analisi di raffronto potrebbe incontrare, è possibile procedere ad un tentativo di assemblaggio tra i due database, con l'accortezza di seguire tutti i passaggi necessari alla minimizzazione (per quanto possibile) di bias e errori statici, nonché assicurandosi di rendere il database finale di facile lettura per il successivo confronto con la casistica di incidenti appositamente raccolta.

[115]Esther Duflo, Rohini Pande «Dams»
[116] Lehner and al., «High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management»

3.3.2 Uniformità dei parametri

In primo luogo, non si può prescindere dall'analizzare i parametri su cui ogni database basa la propria classificazione, con particolare interesse ad eventuali differenze che dovrebbero subire un adeguamento opportuno. Si parte dal database NPDP (piccole dighe), il quale categorizza le proprie voci secondo:

- Nome diga: la denominazione dell'invaso non risulta naturalmente uno degli oggetti della razionalizzazione in corso nel presente paragrafo, trattandosi di un dato univoco. Conviene tuttavia verificare che non vi siano anomalie di definizione, visto che talvolta il nome della diga è frutto di una traduzione o subisce deformazioni e aggiunte dovute alle convenzioni locali; ad esempio, è stata uniformata la notazione per gli impianti accessori rispetto all'invaso principale, secondo una numerazione in numeri arabi e non romani. Non sono previste ulteriori modifiche, ad eccezioni di verifiche puntuali su voci dubbie, come già effettuato nel corso dell'analisi specifica del database
- Stato: si è prima di tutto verificato che la suddivisione territoriale in essere non presentasse incongruenze rispetto all'attuale configurazione politica internazionale (ad esempio Stati di nuova formazione), ma trattandosi di dati aggiornati al 2014 non sono stati riscontrati problemi di sorta. E' stata naturalmente assicurata la corretta grafia di ogni Paese, calibrata sulla base della classificazione ICOLD in quanto sottoinsieme di quest'ultima.
- Provincia: l'ulteriore suddivisione territoriale è stata inserita unicamente a titolo informativo e per favorire la distinzione tra record omonimi, in particolare in ambito statunitense. Non essendo oggetto di alcune correlazione o distribuzione statistica, essa è stata ignorata nell'ambito della costituzione del database finale, limitandosi ad inserirla a lavoro ultimato per coerenza d'insieme
- Tipologia generale (Figura 99): tale parametro risulta particolarmente singolare e di difficile incasellamento in un database che deve costituire una sintesi di fonti diverse. Pertanto, si è deciso di fare affidamento unicamente al parametro di Tipologia Primaria estratto in precedenza (in maniera del tutto identica alle analisi indipendenti)[117].

[117] Emiroglu, «Influences on Selection of the Type of Dam»

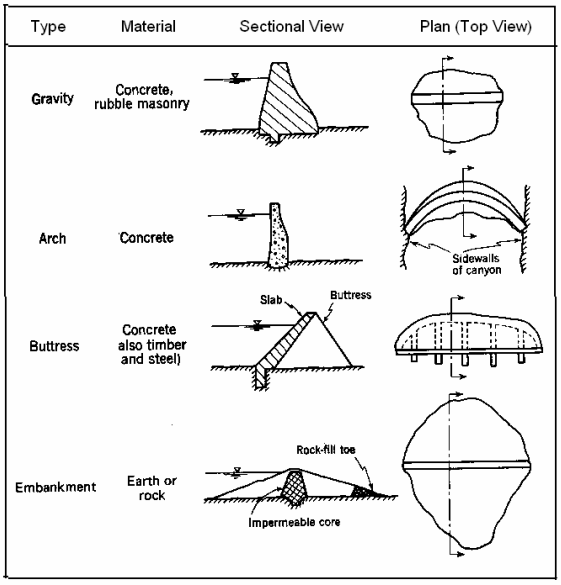


Figura 99 - Alcune tra le tipologie strutturali più frequenti

- Tipologia primaria: questa categoria è la prima a dover subire un'omogeneizzazione in accordo con l'equivalente ICOLD. Non essendo possibile semplificare questa operazione adeguando semplicemente una suddivisione all'altra, ad essa sarà dedicato un intero paragrafo. A titolo di completezza, si illustra di seguito tale categorizzazione, prima della modifica (Tabella 9):

Arch
Barrage
Buttress
Concrete
Earth
Gravity
Masonry
Multiple Arch
Other
Rockfill
Stone
Timber Crib
Unknown

Tabella 9 - Suddivisione Tipologica NPDP pre-calibrazione

- Rischio: pur trattandosi di un parametro molto interessante (a maggior ragione considerando il successivo confronto in ambito di sicurezza con gli incidenti), si tratta di una classificazione già ritenuta molto selettiva in quanto associata unicamente ai dati USA e in ogni caso assente in ICOLD. Di conseguenza, tale colonna non sarà inserita nel database finale
- Funzione: in maniera del tutto analoga alla Tipologia Primaria, si tratta di una suddivisione che va tarata tramite confronto con gli scopi individuati nel database ICOLD, possibilmente favorendo quella più generale; questo perché risulta più semplice e affidabile accorpare due funzioni simili piuttosto che andare ad aumentare il grado di dettaglio di una funzione più generica (senza considerare che non esistono dati di approfondimento in merito). Si pubblica di seguito la classificazione pre-confronto(Tabella 10):

Debris Control
Fire Protection
Fishery and Wildlife
Flood Control
Grade stabilization
Hydroelectric
Irrigation
Navigation
Other
Recreation
Tailings
Unknown
Water Supply

Tabella 10 - Suddivisione per Funzione pre-calibrazione del database NPDP

- Altezza: trattandosi della variabile che sancisce la divisione tra "Small" e "Large" Dams, non deve ovviamente andare incontro ad omogeneizzazione, in quanto i due intervalli saranno complementari. Una volta completato l'assemblaggio, sarà tuttavia necessario stimare se valga la pena variare la suddivisione in classi proposta per l'analisi del database NPDP, che si riporta per completezza di seguito (Tabella 11):

	Intervallo [m]
Classe 1	0-2.5
Classe 2	2.5-5
Classe 3	5-7.5
Classe 4	7.5-10
Classe 5	10-12.5
Classe 6	12.5-15

Tabella 11 - Suddivisione per Classi di Altezza pre-calibrazione del database NPDP

  Questo per motivi di coerenza con il range di altezza ICOLD (fermo restando il limite a 15 metri per continuare a sancire la soglia internazionalmente riconosciuta tra piccole e grandi dighe)
- Bacino: per quanto riguarda la distribuzione dell'ampiezza di invaso, l'unico accorgimento occorrente resta quello di assicurarsi che l'unità di misura sia la stessa per entrambi i database. Effettivamente, vengono impiegati i metri cubi; tuttavia, in ICOLD, per ragioni di leggibilità e di occorrenza molto limitata di valori prossimi allo zero, la scala parte da 10^3 mc. Se si applicasse tale moltiplicatore al database NPDP, si avrebbe unicamente una decina di casi al di sotto dei 1000 mc (per cui in ogni caso basterebbe impiegare un valore decimale), pertanto si è scelto di fare riferimento alla classificazione ICOLD. Ovviamente, potrebbe essere opportuno valutare una scala diversa da quella impiegata in precedenza (i cui limiti superiori e inferiori sono rappresentati da potenze di 10).

Studiando allo stesso modo i criteri di organizzazione del database ICOLD (grandi dighe):

- Nome: come specificato in precedenza, non occorre eseguire nessuna operazione particolare in questo ambito, in quanto si tratta di un dato inserito unicamente per permettere

approfondimenti su determinati invasi oppure per verificare la presenza di errori di registrazione oppure doppioni. Come prima però si è stabilita la convenzione di numerare le dighe afferenti allo stesso complesso tramite numeri arabi e non romani.

- Continente: questo dato risulta mancante nel database NPDP, anche se di ovvia attribuzione sulla base dello Stato. In caso di assemblaggio sarà quindi opportuno implementare questo criterio (dall'interesse statistico non trascurabile, per quanto generico) sulla base di una suddivisione come la seguente (Tabella 12):

Africa
Asia
Austral-Asia (Oceania)
Central America
Europe
North America
South America

Tabella 12 - Suddivisione per Continente del database ICOLD

La divisione dell'America in tre settori (di cui uno molto piccolo, ovvero quello dell'America Centrale) è da attribuirsi unicamente a ragioni di uniformità rispetto alle convenzioni geografiche individuate nella ricerca degli incidenti, nonché per esaltare differenze territoriali di un continente altrimenti troppo contraddittorio.

- State/Province/Country: si tratta ovviamente dello stesso parametro analizzato in precedenza, a cui tocca unicamente una ridenominazione in "Provincia", senza che questo impatti minimamente sullo studio successivo, visti i presupposti.

- Tipologia generale: nel caso ICOLD, la tipologia generale presenta una configurazione spesso complessa (arrivano ad intervenire anche quattro o cinque tipologie contemporaneamente) e per di più sotto forma di sigle di due lettere. La trasformazione di questa colonna in una configurazione simile a quella NPDP richiederebbe uno sforzo computazionale esageratamente elevato e non giustificato in quanto si tratta di un parametro che non sarà oggetto di un'analisi statistica (in quanto si farà riferimento alla Tipologia Primaria, più immediata da mettere in relazione con altri parametri in maniera univoca)[118]

- Tipologia primaria: rispetto a quanto specificato nel paragrafo precedente, non intercorrono considerazioni ulteriori, se non quella legata alla necessità di omogeneizzare tipologie diverse, in particolare tra quelle meno frequenti. Al fine di evidenziare la diversità intrinseca delle due categorizzazione, si allega di seguito quella ICOLD (Tabella 13):

[118] IDC Technologies, «Dams and its types»

Arch
Barrage
Buttres
Earth
Gravity
Multiple Arch
Others
Rockfill
Unlisted

Tabella 13 - Suddivisione per Tipologia pre-calibrazione del database ICOLD

- Funzione: anche in questo caso i ragionamenti da effettuare riguardano unicamente la razionalizzazione dei vari scopi a cui sono adibiti gli invasi, che nel caso delle Large Dams risultano in numero inferiore sia perché alcuni di essi hanno senso unicamente per bacini piccoli, sia per differenze di classificazione tra i due database. Sarà necessario verificare se può aver senso mantenere scopi quali "Fire Protection" che possono essere associati unicamente alle dighe inferiori ai 15 metri di altezza (e quindi con il rischio di generare deviazioni statistiche al momento delle correlazioni) oppure classificarli come funzioni generiche. In ogni caso, si allega la suddivisione funzionale ICOLD (Tabella 14).

Fish Farming
Flood Control
Hydroelectric
Irrigation
Navigation
Others
Recreation
Unknown
Water Supply

Tabella 14 - Suddivisione per Funzione pre-calibrazione del database ICOLD

- Altezza: analogamente a quanto affermato in precedenza, l'altezza è l'unica variabile che non sarà condivisa tra i due database, in quanto discriminante dell'unione degli stessi. Ovviamente, sarà necessario valutare, in fase di studio delle correlazioni, la possibilità di modificare le classi di altezza che al momento si presentano così (Tabella 15):

	H Min [m]	H Max [m]
Classe 1	15	20
Classe 2	20	25
Classe 3	25	30
Classe 4	30	40
Classe 5	40	50
Classe 6	50	75
Classe 7	75	100
Classe 8	100	150
Classe 9	150	200
Classe 10	200	350

Tabella 15 - Suddivisione per Altezza del database ICOLD

- Bacino: anche in questo caso, non sono richiesti accorgimenti particolari (si tratta di una variabile numerica e non categorica), considerando che tra l'altro si è scelta come unità di

misura di base i 10^3 mc, esattamente come prevede l'output ICOLD. L'unico ragionamento potrebbe eventualmente coinvolgere la suddivisione in classi, per quanto quella già adottata per il database delle grandi dighe sia probabilmente la più esaustiva (Tabella 16):

	V Min [10^3 mc]	V Max [10^3 mc]
Classe 1	0	10
Classe 2	10	100
Classe 3	100	1000
Classe 4	1000	10000
Classe 5	10000	100000
Classe 6	100000	1000000
Classe 7	1000000	10000000
Classe 8	10000000	100000000
Classe 9	100000000	1000000000
Classe 10	1000000000	10000000000

Tabella 16 - Suddivisione per Classi di Volume di Invaso del database ICOLD

- Anno: l'anno di costruzione costituisce una variabile decisamente interessante dal punto di vista statistico, ma il fatto che esso non sia trattato da NPDP e nell'impossibilità di reperire le date per ogni singolo record in ambito di Small Dam ha contribuito a sostenere la necessitò di ignorare questa variabile nella costruzione del database complessivo[119].

Una volta illustrate tutte le variabili potenzialmente da coinvolgere, si può procedere con l'omogeneizzazione di quelle che si presentano in veste diversa tra i due database, tenendo conto di tutti i limiti e le peculiarità appena descritti.

[119] Bureau of Reclamation, «History of building the main dams and reservoirs»

3.3.3 Omogeneizzazione Tipologia Primaria

NPDP	Database complessivo	ICOLD
Arch	Arch	Arch
Barrage	Barrage	Barrage
Buttress	Buttress	Buttres
Earth	Earth	Earth
Concrete	Gravity	Gravity
Gravity		
Multiple Arch	Multiple Arch	Multiple Arch
Masonry	Others	Others
Other		
Timber Crib		
Rockfill	Rockfill	Rockfill
Stone		
Unknown	Unknown	Unlisted

Tabella 17 - Omogeneizzazione della Tipologia Primaria per il database complessivo

Come si può vedere dalla tabella soprastante (Tabella 17), che sintetizza il percorso di uniformazione della variabile tipologica, la classificazione finale si avvicina molto a quella ICOLD. Questo sia in ragione della maggiore completezza complessiva di questo database, sia soprattutto per la sua categorizzazione più generica, che di conseguenza si adatta meglio a raffigurare il frutto di un lavoro di inevitabile approssimazione (si è ricordato più volte come l'unione dei due database, profondamente diversi tra loro, rappresenti un'operazione molto delicata dal punto di vista statistico). Inoltre, le tipologie ICOLD rappresentano un sottoinsieme proprio di quelle NPDP (al netto di qualche divergenza ortografica che non ne inficia il significato di fondo), pertanto si tratterebbe unicamente di condensare tra loro alcune tipologie NPDP, meno frequenti, che possano comparire sotto la stessa denominazione senza generare confusione. Va comunque detto che, rispetto alla classificazione ICOLD originaria, si è provveduto a correggere il termine "Buttress" che risulta mancante di una S finale, contrariamente alla dicitura NPDP corretta, nonché a trasformare "Unlisted" in "Unknown" per maggiore coerenza interna e nei confronti di altre variabili che compariranno nel database finale. Per quanto riguarda le fusioni di classi, essendo le dighe a gravità per la massima parte realizzate in CLS (dovendo agire come un corpo rigido, i materiali granulari sono da escludere), si è scelto di accomunare "Gravity" e "Concrete" sotto la stessa voce, nello specifico definita come "Gravity"; si è tuttavia consci del fatto che non per forza una diga in cemento armato debba assumere una forza a gravità (basti pensare a quelle ad arco), ma essendo presenti in entrambi i database numerose altre categorie generalmente concepite in cemento armato, si è ritenuto che i casi di non aderenza tra le due classi sopra citate siano minimi[120]. Si è poi stati costretti ad eliminare la sottile differenza tra "Rockfill" e "Stone" esistente all'interno del database NPDP, e che rimanda ad una diversa tecnica costruttiva, pur se con un materiale analogo (pietra da costruzione, opportunamente selezionata). Nell'impossibilità di distinguere le caratteristiche progettuali sulla base unicamente delle informazioni contenute nella banca dati NPDP, la scelta è stata quella di attribuire la caratteristica "Rockfill" ad entrambe (avendo

[120] Bureau of Reclamation, «Design of Gravity Dams»

l'accortezza di considerare, nell'ambito delle successive analisi, soltanto la caratteristica del materiale roccioso e non implicazioni legate alla struttura specifica[121]). Infine, non si è potuto evitare di aggiungere altre due categorie alla variabile "Others" che ovviamente comporta la perdita di dettaglio dello studio: si tratta di "Masonry" e "Timber". Nel secondo caso, è quanto mai improbabile immaginare grandi dighe realizzate in legno, quindi si tratta di una soluzione tutto sommato coerente; per quanto riguarda le dighe in mattoni, esse esistono anche al di sopra dei 15 metri, ma la loro occorrenza relativa resta sufficientemente basta per considerare l'approssimazione accettabile. Ovviamente, anche tutte le dighe NPDP classificate come "Other" sono state aggiunte alla categoria "Others". In tutti gli altri casi, la corrispondenza tra le voci ha permesso di mantenere le rispettive tipologie. Si compone infine così il quadro complessivo, che conta 9 differenti suddivisioni tipologiche (Figura 100).

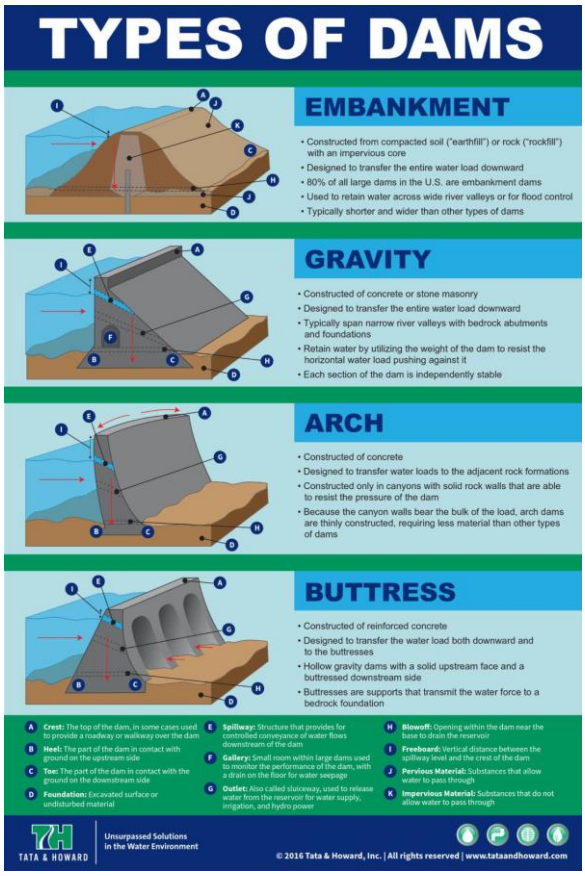


Figura 100 - Tipologie di dighe illustrate nel dettaglio

[121] US Army, «General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams »

3.3.4 Omogeneizzazione Funzione

NPDP	Database Complessivo	ICOLD
Fishery and Wildlife	Fish Farming	Fish Farming
Fire Protection	Fire Protection	
Debris Control	Flood and Debris Control	Flood Control
Flood Control		
Hydroelectric	Hydroelectric	Hydroelectric
Irrigation	Irrigation	Irrigation
Navigation	Navigation	Navigation
Grade stabilization	Others	Others
Other		
Tailings		
Recreation	Recreation	Recreation
Unknown	Unknown	Unknown
Water Supply	Water Supply	Water Supply

Tabella 18 - Omogeneizzazione per Funzione del database complessivo

Oltre alla tipologia, l'altro fattore che richiede un confronto approfondito, al fine di stabilire una categorizzazione terza che possa agevolmente comprendere i dati provenienti tanto da ICOLD quanto da NPDP (Tabella 18), è rappresentato dalla funzione dell'invaso[122]. Anche in questo caso, la suddivisione ICOLD risulta più generica e costituirà la base di partenza per la classificazione finale; tale assunzione è suffragata dal fatto che ancora una volta, la suddivisione funzionale ICOLD risulta un sottoinsieme proprio di NPDP, quindi non sarebbe conveniente introdurre ulteriori categorie che non sarebbero direttamente presenti in alcun database d'origine. L'unica eccezione è rappresentata dalla classe "Fire Protection", che presenta un'incidenza relativa (all'interno del database "Small Dams") superiore al 10%. Si accetta quindi che tale dato rimanga confinato agli invasi di altezza inferiore ai 15 metri, per evitare di doverlo classificare come "Others" e diminuire sensibilmente la precisione dell'analisi; operazione che invece è necessario fare per "Grade Stabilization" e "Tailings", considerato anche il numero molto basso di record a riguardo. Infine, nell'ottica di conservare la dicitura "Debris Control" che mantiene notevole interesse a livello ingegneristico, si è scelto di creare la classe "Flood and Debris Control" che, malgrado la netta preponderanza di opere volte a contenere le piene piuttosto che le colate, fa ora riferimento ad una più generica salvaguardia dal dissesto idrogeologico (Figura 101).

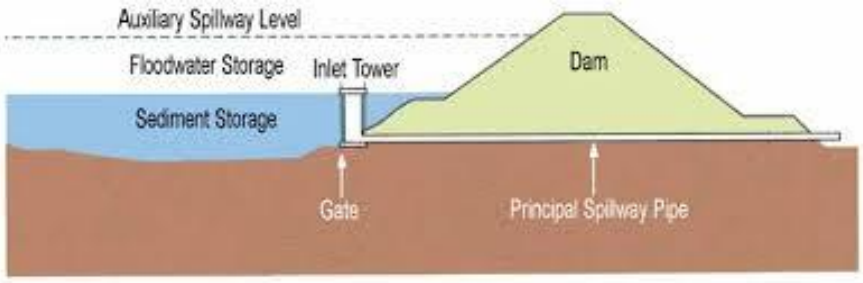


Figura 101 - Schema di una diga per il controllo delle piene

[122] Large Dam Database in Greece, «Functions and uses of dams»

3.3.5 Omogeneizzazione varie

La Tipologia Primaria e la Funzione rappresentavano le uniche due variabili su cui era necessario intervenire per costituire nuove classificazioni omnicomprensive. Per gli altri fattori non è richiesta alcuna operazione particolare, ad eccezione di:

- Divisione dei valori di bacino per 1000 per quanto riguarda il database NPDP (riportarsi a 10^3 mc)
- Rimuovere le colonne "Tipologia generale", "Classe di Rischio" e "Anno di costruzione", le ultime due per mancanza di corrispondenza reciproca, la prima perché trattata unicamente sotto forma della tipologia preminente
- Verificare la corrispondenza tra gli Stati coinvolti (controllare eventuali denominazioni duplici)
- Attribuire il valore "Unknown" in tutte le celle vuote di ciascun record, a meno di situazioni particolari (per uniformità di analisi successiva e nell'ottica di far emergere le criticità in fase di reperimento delle informazioni)

3.3.6 La ricalibrazione di NPDP

Seguendo tutte le precauzioni finora indicate, il database finale si mostrerebbe teoricamente di facile ed immediata costruzione. L'ultima problematica da risolvere, nonché la più ostica, riguarda la differenza di robustezza intrinseca delle due banche dati: da una parte ICOLD che può contare su una distribuzione omogenea a livello mondiale, dall'altra NPDP con un focus esageratamente concentrato sugli USA. Se si vuole pervenire ad un database che assicuri una certa stabilità dal punto di vista dell'analisi statistica, pur accettando approssimazioni inevitabili, è necessario ricalibrare il database NPDP per avvicinarlo a costituire il naturale prolungamento di ICOLD per altezze inferiori a 15 metri. E' infatti semplice realizzare come i poco più di 60 000 record di NPDP non possano in alcun modo rappresentare neanche lontanamente la popolazione mondiale in termini di piccole dighe. Questo ragionamento scaturisce naturalmente sia da dati disponibili in letteratura (in cui si accenna diffusamente alla presenza di almeno 400 000 piccole dighe su tutto il pianeta, un dato che potrebbe a sua volta approssimato per difetto, vista l'intrinseca difficoltà a individuare le opere più piccole[123]), sia dall'irrealistica proporzione di voci relative agli USA (circa il 90%) rispetto al resto del mondo. Gli obiettivi della presente analisi diventano quindi due:

1. Ristabilire un'occorrenza relativa (all'interno del database NPDP) adeguata alla realtà per ogni Paese della banca dati
2. Calibrare anche il numero totale di piccole dighe in confronto a quello delle grandi

In questo modo, sarebbe in linea teorica possibile realizzare un database complessivo sufficientemente robusto al proprio interno. A monte di ogni ragionamento occorre tuttavia stabilire delle ipotesi semplificative in quanto assunzioni:

- Il database ICOLD viene ritenuto totalmente esaustivo per quanto riguarda le dighe al di sopra dei 15 metri. Per tarare efficacemente il database NPDP sulla base dell'altro, non si può prescindere dal considerare la popolazione di invasi in esso fotografata come rappresentativa della situazione mondiale. Tale approssimazione può ritenersi trascurabile

[123] INCOLD, "Small Dams"

dal momento in cui le grandi opere necessitano di una completa comunicazione dei dati e il censimento delle grandi dighe è stato indetto dalla maggior parte degli Stati. Inoltre, ICOLD si appoggia a diversi comitati nazionali per quanto riguarda le indagini ed è attivo da decenni nell'ambito delle Large Dams. Si può pertanto ritenere tale condizioni implicitamente soddisfatta (per quanto possano in realtà esistere alcuni invasi non inseriti nel database, in quanto ad esempio secretati in realtà territoriali in via di sviluppo).

- Allo stesso modo, la quota di Small Dams negli Stati Uniti descritta da NPDP viene ritenuta affidabile, visto il grado di approfondimento che viene dedicato al territorio nazionale all'interno di questa banca dati[124]. Inoltre, si tratta di un numero (circa 55 000) compatibile con il valore registrato in ICOLD per gli invasi maggiori (poco meno di 6500), in un rapporto di circa 1 a 9 che, da approfondimenti vari, risulta piuttosto realistico.
- Si assume che la distribuzione interna del database NPDP, in termini di ogni fattore di suddivisione, sia rappresentativa dell'intera popolazione di piccole dighe; cioè equivale ad ipotizzare che l'estrazione del campione da cui è effettivamente formata la banca dati NPDP sia robusto rispetto alla totalità degli invasi (Figura 102). Si tratta della condizione più esigente e probabilmente la meno realistica, in quanto questo presupporrebbe che NPDP conoscesse la popolazione da cui andare a individuare con criterio e rigore i pochi casi di cui effettivamente dispone[125]. Tuttavia, in mancanza di ulteriori dati e considerando comunque il numero di record non trascurabile, si è optato per tenere in considerazione anche questo criterio (in alternativa non sarebbe possibile procedere). All'atto pratica, si presume che, se ad esempio si registra un 20% di invasi adibiti a idroelettrico tra i record NPDP, vi sia un'identica percentuale di piccole dighe nel mondo il cui scopo è quello di produrre energia idroelettrica.

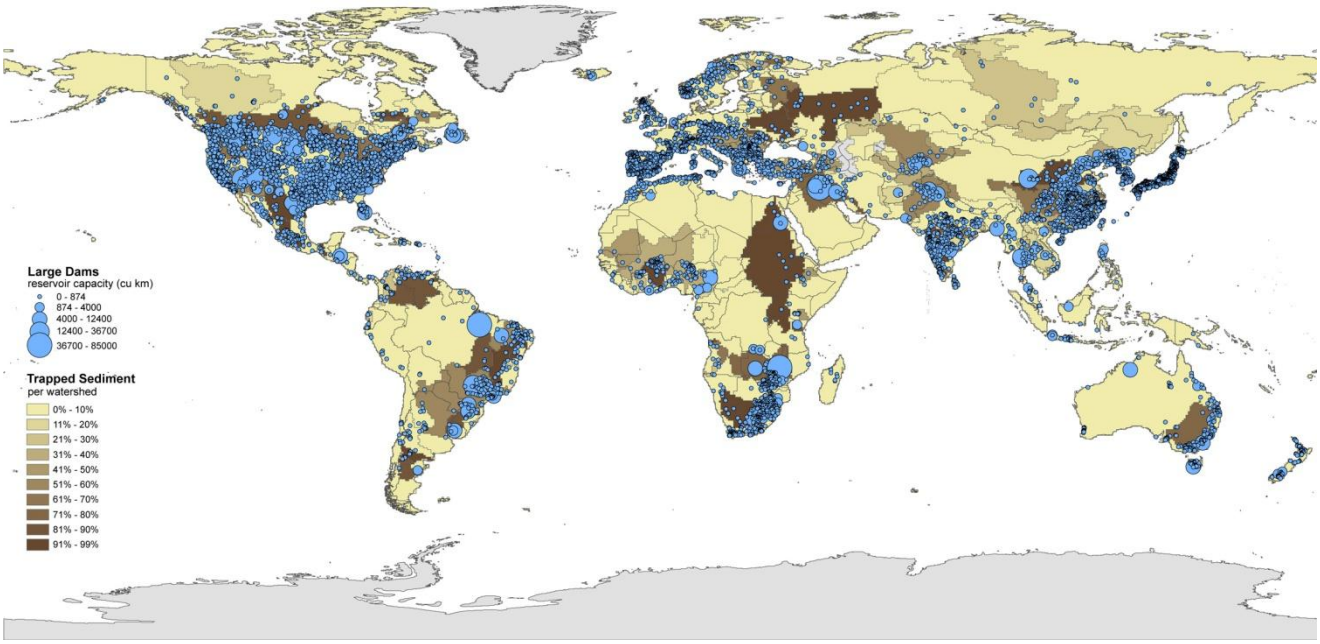


Figura 102 - Distribuzione su scala mondiale delle grandi dighe

[124] Water Power and Dam Construction, «Large or small - does dam size matter?»
[125] Environmental Fact Sheet, «Basic Terms of Dam Characteristics »

L'obiettivo finale di questa calibrazione consiste nell'individuare un moltiplicatore (possibilmente intero) tramite cui, a partire dal dato di ogni singolo Stato, risalire al rispettivo numero di piccole dighe. Questa operazione è possibile in virtù del terzo principio sopra enunciato, in quanto se il campione NPDP è rappresentativo, la moltiplicazione dell'intera banca dati (USA esclusi, ovviamente) non genera alcuna variazione nella distribuzione. Dati poi per validi i valori di numerosità di ICOLD (per ogni Stato) e di NPDP (per i soli USA), si potrebbe pensare di calcolare il rapporto tra il numero di grandi dighe di alcuni Stati e il numero di piccoli invasi entro gli stessi confini. Ovviamente, i rapporti sarebbero diversi per ogni Paese, quindi l'idea è quella di calcolare tale valore per i primi dieci Stati e poi determinarne la media aritmetica, tenendo conto di quest'ultimo come fattore moltiplicativo. Naturalmente ciò impone di considerare che la distribuzione tra grandi e piccole dighe, in termini di numerosità, sia simile a livello mondiale (ulteriore assunzione semplificativa). In assenza di alternative praticabili, si procede a calcolare i rapporti sopra descritti (Tabella 19):

Stato	NPDP	ICOLD	Rapporto
India	2152	3341	0.64
China	2147	23841	0.09
Canada	590	637	0.93
Brazil	427	840	0.51
South Africa	348	1091	0.32
Japan	344	3119	0.11
South Korea	149	1297	0.11
Mexico	115	473	0.24
United Kingdom	104	469	0.22
France	92	660	0.14
Media			**0.33**

Tabella 19 - Rapporto tra le piccole dighe NPDP e le grandi dighe ICOLD, per i primi 10 Stati (USA esclusi)

Se si ipotizza che il valore medio sia rappresentativo e che possa essere esteso anche agli Stati Uniti, diventa possibile moltiplicare il numero di grandi dighe di questi ultimi per 0,33, ottenendo la popolazione attesa (molto più piccola di quella reale) di piccole dighe in USA come se queste non fossero oggetti di un'analisi approfondita, bensì derivassero da ricerche condotte con metodi analoghi a quelli degli altri Paesi. Si ottiene quindi:

$$N°\ di\ piccole\ dighe\ USA\ (valore\ atteso\ NPDP) = 0{,}33 * N°\ grandi\ dighe\ USA\ (valore\ effettivo\ ICOLD) = 0{,}33 * 6395 = \mathbf{2110\ piccole\ dighe}\ (valore\ atteso\ NPDP)$$

Ora non resta che rapportare questo valore ipotetico alla quantità di piccole dighe effettivamente registrate all'interno della banca dati NPDP (che si ricorda assunto come corretto al 100%) per ottenere il fattore moltiplicativo tramite cui replicare i record dei paesi extra-USA al fine di ottenere un database NPDP con uguale distribuzione ma caratterizzato da una popolazione complessiva comparabile con quella ICOLD. Nello specifico si perviene a:

$$Fattore\ moltiplicativo = \frac{N°\ piccole\ dighe\ USA\ (valore\ effettivo\ NPDP)}{N°\ piccole\ dighe\ USA\ (valore\ atteso\ NPDP)} = \frac{55268}{2110} = 26{,}19 \cong 26$$

Sulla base dell'analisi sopra illustrata, è lecito assumere che il database NPDP possa essere ricalibrato replicando per 26 volte i dati di tutti i Paesi presenti nella banca dati, ad eccezione degli USA. Naturalmente, oltre alle approssimazioni già diffusamente precisate, un ulteriore limite della presenta dimostrazione risiede nell'assenza di alcuni Stati all'interno del database NPDP, al contrario trattati in ICOLD; nel database complessivo di prossimo assemblaggio essi risulteranno rappresentati unicamente nella loro popolazione di Large Dams (ma trattandosi di Stati che non si collocherebbero comunque nelle prime posizioni, ciò non genera criticità esagerate).

4 ANALISI DEGLI INCIDENTI

4.1 Analisi statistica

4.1.1 Distribuzione per Continente

La distribuzione sulla base della provenienza continentale evidenzia fin da subito un dato di cui bisognerà tenere conto nel corso dell'intera analisi e che sarà ribadito e puntualizzato ancora meglio al momento dello studio della collocazione geografica più precisa (Tabella 20).

Continente	Numero di dighe
Asia	166929
North America	81607
Europe	22143
Africa	15105
South America	13689
Oceania	3166

Tabella 20 - Popolazione mondiale di dighe per Continente

Anticipando il concetto, appare evidente come la preponderanza dei record legati all'America del Nord sia quanto mai marcata, arrivando a sfiorare il 90% della popolazione totale; questo fenomeno si spiega con l'occorrenza relativa elevata degli incidenti provenienti dal database NPDP, l'unico ad offrire una quantità di dati significativa e approfondita (vedasi paragrafo sulla distribuzione per banca dati); NPDP, per il suo carattere governativo e prodotto del mondo accademico statunitense, ha tendenza a concentrarsi pressoché unicamente sugli incidenti in territorio nazionale. La quota così ampia riservata ai soli Stati Uniti (che vanno a monopolizzare il totale nordamericano, in quanto Messico e Canada presentano un numero di voci comparabile con altre realtà extra-USA) rappresenta inevitabilmente un bias di questa analisi **(**Tabella 21**),** ma il livello di dettaglio e di completezza assicurato dalla banca dati NPDP costituisce comunque una fonte di informazioni da cui non si può prescindere[126].

Continente	Numero di dighe
North America	3231
Europe	288
Asia	72
Africa	28
South America	22
Austral-Asia	19
Central America	3

Tabella 21 - Distribuzione per Continente degli incidenti

Maggiormente interessanti risultano invece le proporzioni che coinvolgono gli altri continenti: Europa e Asia si installano molto alle spalle del Nord America con una proporzione reciproca di circa 4 a 1. Si tratta anche in questo caso, va sottolineato, di un dato relativo all'interesse riservato a

[126] NPDP, «Introduction to NPDP Database»

determinate aree geografiche piuttosto che altre, nonché alla disponibilità di canali di comunicazione privilegiati per l'accesso ad informazioni che spesso, per questioni di sicurezza, sono normalmente riservate, in particolar modo in quegli Stati (come ad esempio la Cina) che applicano misure protezionistiche oppure di salvaguardia da potenziali attentati terroristici. Anche il fatto che Africa, Sudamerica e Oceania presentino una percentuale quasi identicamente bassa (intorno allo 0,5%) deve stupire, soprattutto se si applica il raffronto con la popolazione mondiale di dighe stimata (si ricorda che si tratta di una costruzione su basi probabilistiche descritta nel capitolo precedente):

Continente	Frequenza relativa
Africa	0.19%
Asia	0.04%
Europe	1.30%
North America	3.96%
Oceania	0.60%
South America	0.18%

Tabella 22 - Frequenza relativa della distribuzione per Continente

La frequenza relativa degli incidenti risente dei bias territoriali del database NPDP (Tabella 22): il focus sui Paesi cosiddetti "Occidentali" porta ad aumento considerevole del tasso di incidente in Europa e, in misura perfino maggiore nell'America del Nord. Non a caso, la frequenza relativa di poco meno del 4% appare quanto mai esagerata (significherebbe che a subire incidenti o comunque criticità degne di fotte fosse una diga su 25), e anche quella di 1,30% supera le aspettative medie. Inoltre, sembra paradossale che un continente in via di sviluppo come l'Asia, ma al temo stesso dotato di un patrimonio immenso in termini di dighe (sostenuto principalmente dai grandi colossi emergenti, come India e Cina, e dai Paesi tradizionalmente avanzati, quali Giappone e Corea del Sud) posso avere un tasso di incidenti pari a 0,04, ovvero cento volte inferiore a quello del Nordamerica[127]. Purtroppo, come ribadito più volte, il database si dimostra piuttosto affidabile su tutti i parametri ad eccezione di quelli più strettamente geografici.

[127]Economic Commission for Europe «Dam Safety in Central Asia»

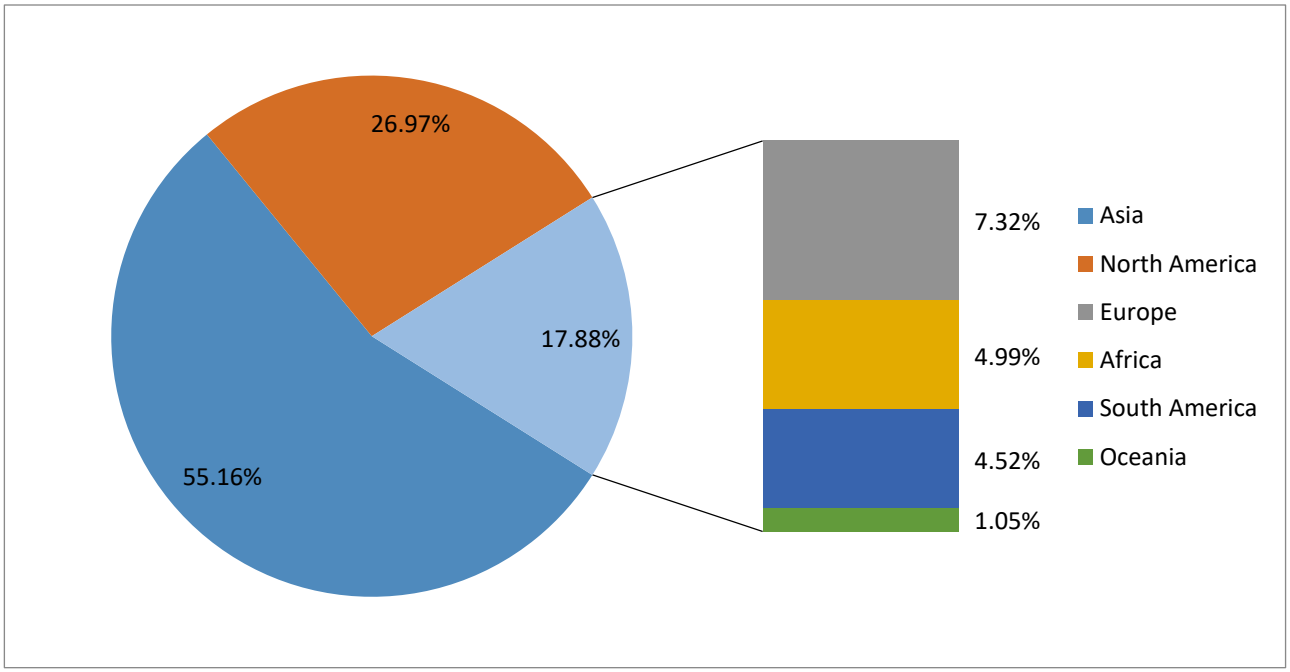


Figura 103 - Distribuzione mondiale della popolazione di dighe

Se confrontata con la distribuzione complessiva degli incidenti, questa suddivisione per Continente (Figura 103) rivela profonde differenze: in maniera molto più realistica, visti i dati accessori raccolti attraverso svariate pubblicazioni scientifiche, più della metà della popolazione mondiale di dighe risulta situata in Asia, coerentemente con la presenza sia di potenze industriali come Giappone e Corea del Sud, sia considerando le potenzialità costruttive di regioni in via di sviluppo e dalla densità abitativa molto elevata, quali ad esempio Cina e India. La quota del Nordamerica risulta invece fortemente ridimensionata ma comunque pronunciata, in linea con la tradizione storica per Stati Uniti e Canada, i due Paesi trainanti del continente in questo ambito, a costruire dighe per sfruttare le imponenti risorse idriche del territorio (Figura 104) (senza trascurare comunque un certo apporto da parte del Messico e di alcuni piccoli Stati del Centro-America); un quarto abbondante delle dighe mondiali risiedono infatti in America del Nord (Figura 104).

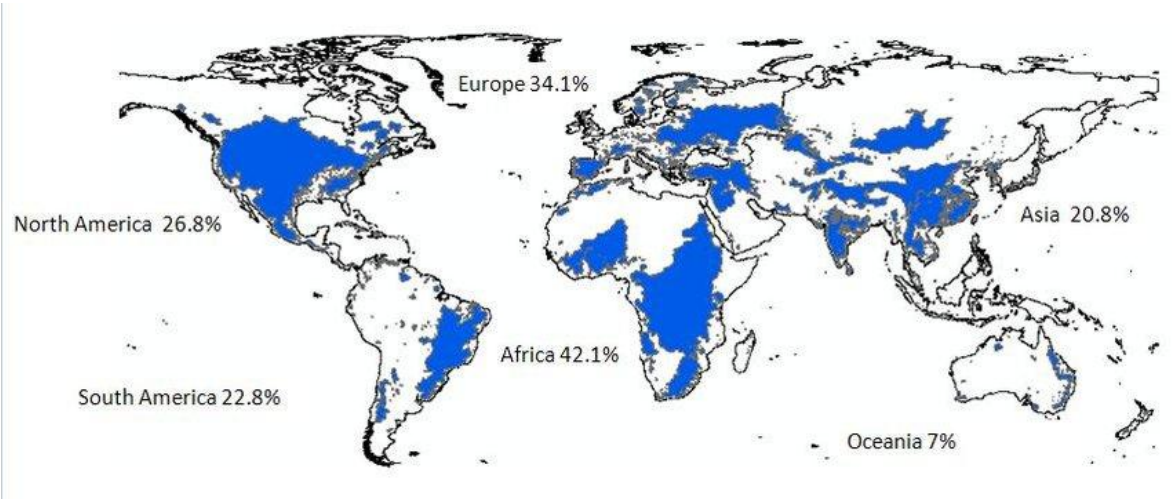


Figura 104 - Percentuale di territorio influenzato da dighe, per continente

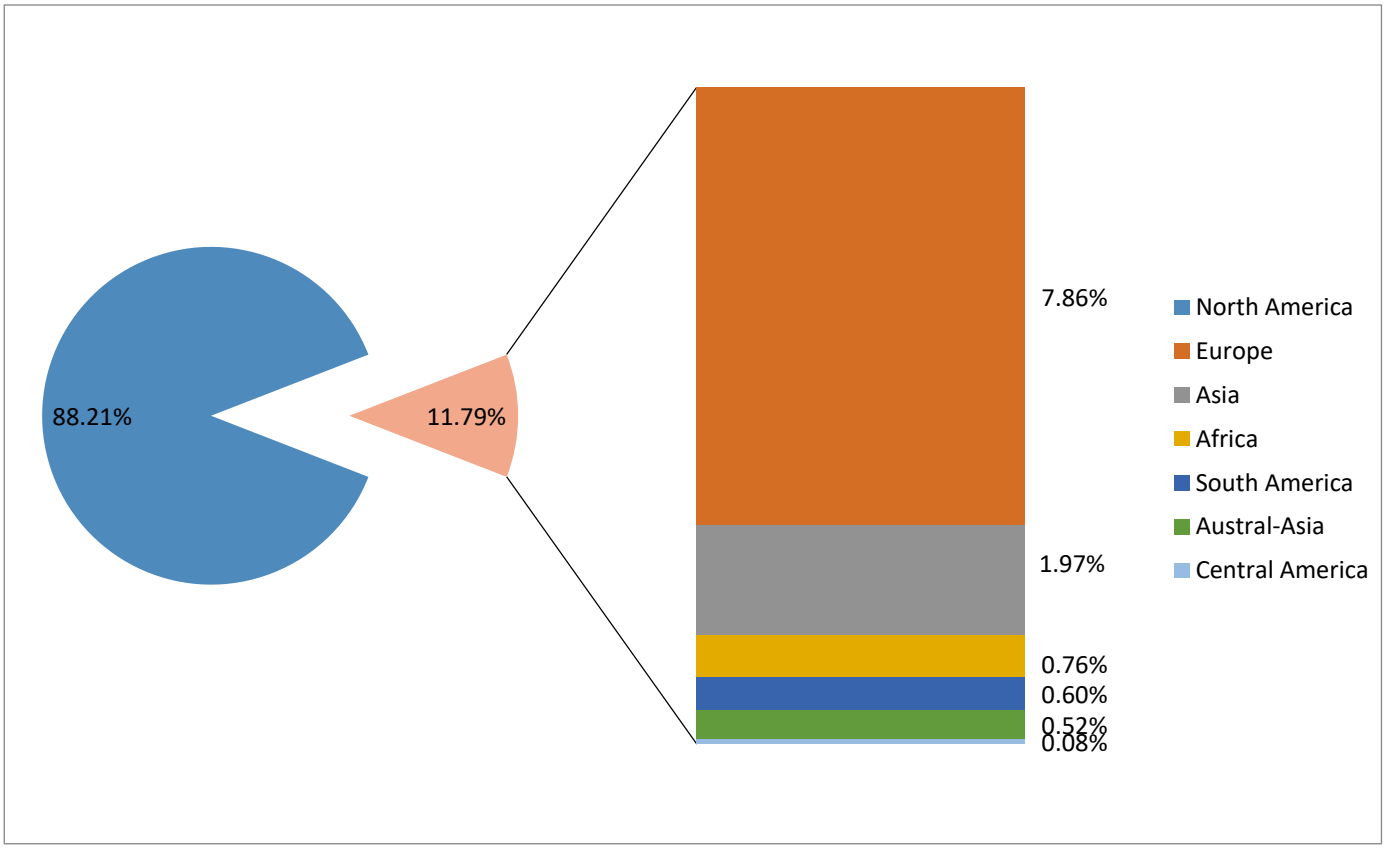


Figura 105 - Distribuzione percentuale degli incidenti

Il restante 20% scarso è da suddividere tra il resto del mondo, con l'Europa in prima fila e unico continente fra i tanti a evidenziare un allineamento quasi perfetto tra popolazione di dighe e numero di incidenti: una coincidenza che sottolinea l'interesse in termini di sicurezza sempre molto significativo all'interno dei confini del Vecchio Mondo[128]. Tuttavia, in proporzione ad Africa e Sudamerica, la proporzione europea non appare più così dominante, in quanto questi ultimi si collocano nell'orbita di un non trascurabile 5% di invasi, cosa che sembra stonare con le misere percentuali di incidenti registrati nelle rispettive aree: si tratta di un problema di scarsa copertura informativa in due realtà dalla geografia complicata (l'esistenza di ampie foreste e in generale di ambienti ostili all'uomo riduce la possibilità di mappatura completa degli incidenti) e tendenzialmente piuttosto povere, l'Africa in particolare. Di conseguenza, la cultura del Rischio ingegneristico non si dimostra sufficientemente sviluppata da assicurare un'adeguata correlazione tra popolazione di dighe e numero di incidenti correttamente individuati (Figura 105). Infine, in maniera simile all'Europa, l'Oceania raggiunge discreti livelli di equiparazione tra i due database, grazie anche ad una quantità di invasi piuttosto limitata che facilita un monitoraggio più capillare, a maggior ragione in realtà dall'imprinting anglosassone come l'Australia e, in misura leggermente minore, la Nuova Zelanda.

Nell'ottica di valutare più nello specifico l'entità dei bias territoriali sui vari database, si propone anche un confronto separato tra grandi e piccole dighe (la cui soglia resta quella dei 15 metri di altezza), rispettivamente ricavate dal database ICOLD e da quello NPDP (nella sua forma originaria

[128] Joeren Van Herk, «Dam removal Europe Report»

non sottoposta a calibrazione, in modo tale da saggiare il grado di robustezza intrinseco della banca dati).

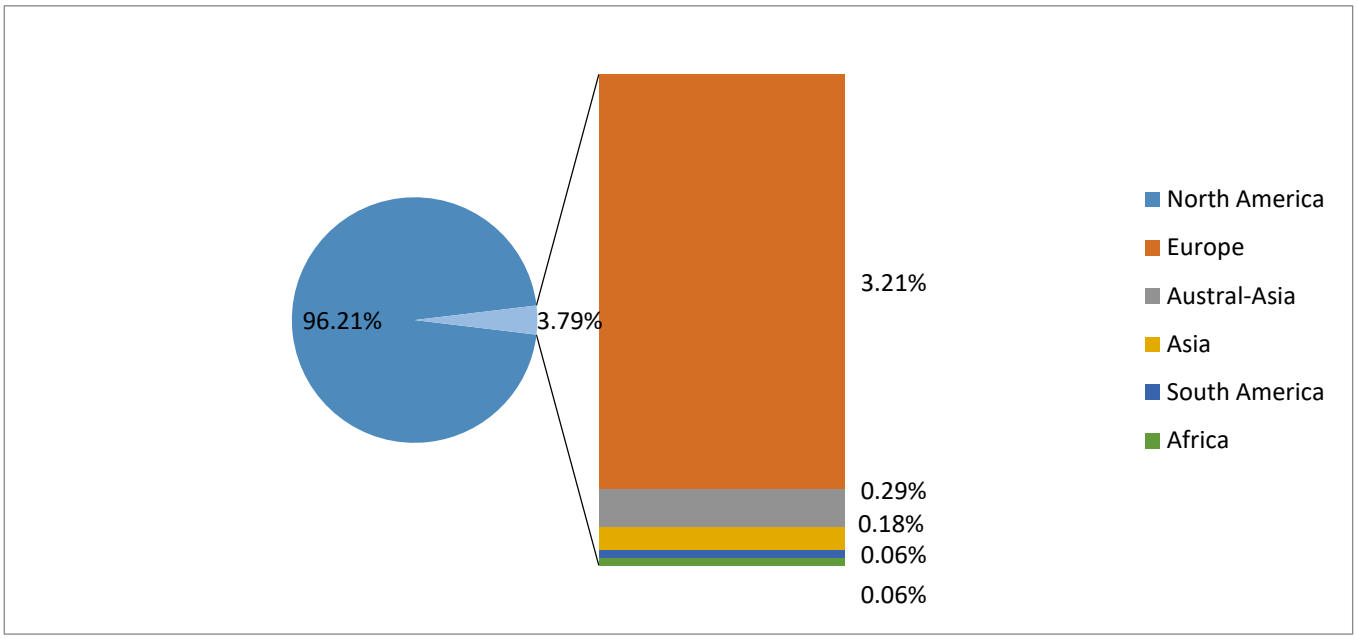


Figura 106 - Distribuzione percentuale degli incidenti di piccole dighe per Continente

Nel caso degli incidenti relativi alle piccole dighe (Figura 106), l'occorrenza relativa dei record nordamericani appare spropositata, in quanto superiore al 96%; se si considera poi che il restante 4% è occupato per più di tre quarti da incidenti in Europa e che una regione come l'Asia, caratterizzata da una popolazione di dighe molto elevate non arriva allo 0,2%, si capisce fin da subito come il database incidenti presenti una distribuzione geografica fortemente influenzata dalla banca dati NPDP. La proporzione appare perfino maggiore di quella delle grandi dighe, in quanto per queste ultime esistono numerose voci provenienti dagli altri database consultati, i quali, essendo principalmente di tipo testuale e legati ad articoli scientifici invece che a banche dati, tendono a concentrarsi maggiormente sugli invasi più ampi. Al contrario, il loro impatto in ambito di piccole dighe è estremamente limitato e questo contribuisce ad aumentare la deviazione statistica già di per sé molto pronunciata. Altra incongruenza è rintracciabile nella quota riservata agli incidenti in Oceania, che risulta stranamente il terzo continente al mondo per numero di eventi, malgrado l'estensione territoriale decisamente contenuta e una densità di piccole dighe maggiore della media mondiale ma non tale da giustificare questa preponderanza rispetto a continenti sicuramente molto più sviluppati dal punto di vista dell'accumulo di risorse idriche, come Asia e America del Sud. Paradossalmente, però, il confronto con la distribuzione delle piccole dighe appare significativamente compatibile in termini di percentuali: questo perché il database NPDP, unica fonte considerata all'interno del presente studio per la stima della popolazione di Small Dams, rappresenta anche, come specificato poche righe più su, l'unica banca dati effettivamente robusta tra quelle consultate (circa 3000 casi su 3600).

Continente	Numero di incidenti
North America	467
Europe	108
Asia	62
Africa	26
South America	20
Austral-Asia	14
Central America	3

Tabella 23 - Distribuzione per Continente degli incidenti di grandi dighe

Il confronto relativo alle grandi dighe mostra una situazione piuttosto curiosa: le proporzioni si avvicinano molto tra loro (a livello percentuale), ma le rispettive quote appartengono a continenti diversi (Tabella 23). Si tratta sicuramente di una casualità statistica, ma che evidenzia ancora una volta come il bias geografico del database degli incidenti sia fortemente influenzato dalla banca dati NPDP.

Continente	Numero di grandi dighe
Asia	33053
North America	7588
Europe	6374
Africa	2047
South America	1330
Austral-Asia	736
Central America	21

Tabella 24 - Distribuzione per Continente delle grandi dighe

Infatti, se ci si limita alla distribuzione delle grandi dighe ICOLD (tra l'altro più robusta di quella NPDP, in quanto ritenuta completa con un tasso di affidabilità superiore al 90%), la configurazione dei Continenti appare in linea con le informazioni reperite finora (Tabella 24): l'Asia la fa da padrone con più di 30 000 grandi invasi, a seguire a grande distanza Nordamerica e Europa, entrambe realtà storiche con una forte tradizione di costruzione di dighe alle spalle, ma caratterizzate da necessità inferiori al continente più popoloso del mondo. Il fatto che Africa e Sudamerica siano quanto meno in linea risponde alle aspettative: due continenti dall'estensione territoriale analoga e dalla storia tecnologica piuttosto recente, dotati tra l'altro di ampi patrimoni idrici accanto a zone prevalentemente desertiche. Infine, l'occorrenza relativa piuttosto elevata dell'Oceania non deve stupire, se si considera il suo imprinting britannico e la necessità di fare fronte ad una superficie desertica stimata del 20% .

Continente	Frequenza relativa
Africa	1.27%
Asia	0.19%
Austral-Asia	1.90%
Central America	14.29%
Europe	1.69%
North America	6.15%
South America	1.50%

Tabella 25 - Frequenza relativa degli incidenti di grandi dighe

Il bias dell'America Centrale è evidente (Tabella 25): a causa del numero piuttosto limitato di grandi dighe documentate, a fronte di alcuni incidenti che sono stati giustamente implementati nel database per ragioni di importanza e di rappresentazione territoriale, si raggiunge una quota impensabile del 14,29%. Se fosse vera, si potrebbe immaginare che una grande diga su sette vada incontro a fenomeni dannosi nel corso della sua vita utile, il che appare certamente improbabile, soprattutto se confrontato con le quote più modeste degli altri Continenti. E' altrettanto vero che anche quest'ultime risultano sovrarappresentate, principalmente a causa della grande occorrenza relativa della grandi dighe nel database incidenti (fenomeno dovuto ad un interesse più dettagliato per le grandi opere, in ambito di Letteratura Scientifica e Ricerca Ingegneristica).

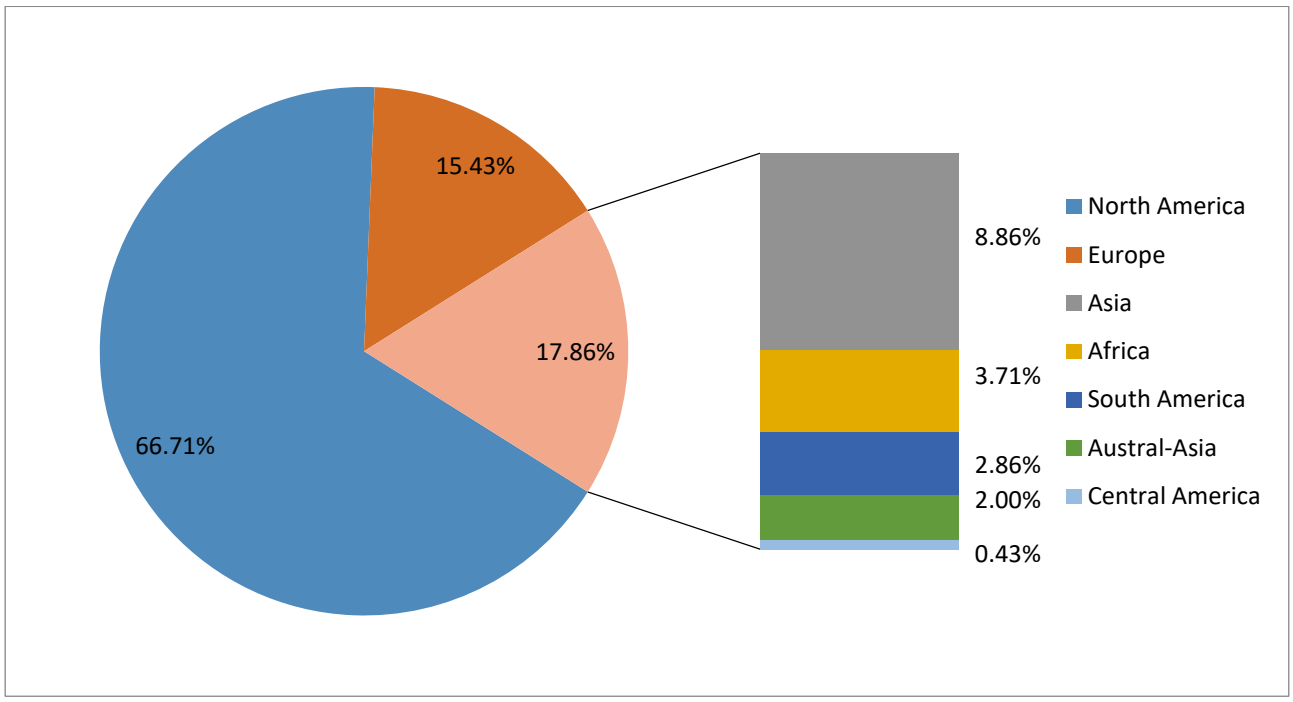


Figura 107 - Distribuzione percentuale degli incidenti di grandi dighe per Continente

Andando nel dettaglio, in entrambi i casi si individua un continente che arriva a ricoprire i due terzi circa del totale: nel caso degli incidenti si tratta naturalmente del Nordamerica (Figura 107), a causa dell'apporto deviatorico degli USA, mentre per le grandi dighe (che si ricordano appartenere a quello che è stato confermato come il database più robusto dal punto di vista statistico, ovvero

ICOLD) il continente dominante è l'Asia (Figura 108). Al secondo posto, con il 15%, si ha il Nordamerica per ICOLD e l'Europa per il database incidenti; continenti invece invertiti per la terza posizione, con una quota media del 10%. Anche in questo caso, Asia, Africa e Sudamerica sembrano notevolmente sottostimate dal punto di vista degli incidenti, al contrario dell'Oceania che invece raggiunge un ragguardevole 2% del totale degli incidenti, a fronte di un'occorrenza relativa di invasi di poco inferiore a 1,5%.

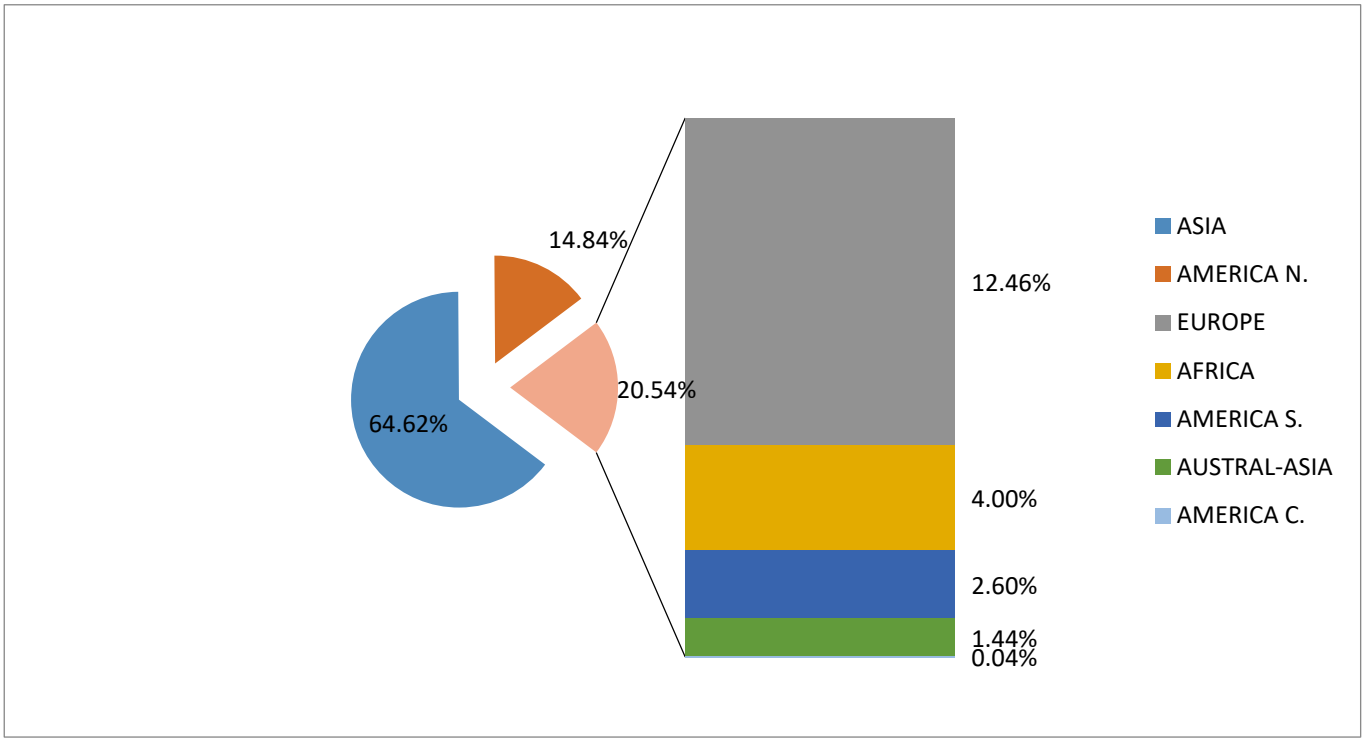


Figura 108 - Distribuzione percentuale delle grandi dighe per Continente

Si ha quindi la conferma definitiva che il database incidenti, contingentemente legato a NPDP, si focalizza in maniera estremamente pronunciata sul Nordamerica e a seguire, con quote nettamente inferiori ma comunque significativamente alte rispetto al resto del mondo, sull'Europa, non tanto per un effettivo verificarsi diffuso di incidenti, quanto piuttosto per l'accesso ad un maggior numero di dati inerenti alle criticità delle dighe nei Paesi cosiddetti "Occidentali" (ovvero quelli industrialmente sviluppati, non una connotazione geografica, e comprendenti ad esempio anche l'Australia)[129].

[129]Homeland Security, «Dams Sector Security Awareness Guide»

4.1.2 Distribuzione per Stato

Stato	Numero di incidenti
United States	3223
United Kingdom	119
France	119
India	38
Australia	17
South Africa	15
Spain	11
Japan	10
Algeria	9
Canada	7

Tabella 26 - Numero di incidenti per Stato

Ovviamente, il bias territoriale analizzato al paragrafo precedente e relativo ai Continenti, è figlio di un interesse peculiare per determinati Stati mondiali, tra cui ovviamente spiccano gli Stati Uniti, che arrivano a raccogliere ben 3223 incidenti documentati (Tabella 26); questo perché, come si vedrà in seguito, NPDP costituisce l'ossatura del database incidenti con percentuali dell'ordine dell'80% del totale. Trattandosi di un ente associato alla Stanford, l'accesso ai dati per gli USA è sicuramente agevolato, senza contare che il database NPDP nasce proprio dall'esigenza di mappare il patrimonio nazionale di dighe (e relativi incidenti). Le altre due realtà che presentano un numero congruo di record (pur se largamente inferiore a quello degli Stati Uniti) sono Francia e Regno Unito, grazie rispettivamente al database ARIA di produzione Francese e ai dati combinati tra British Dam Society e Environment Agency UK. Altri Stati significativi dal punto di vista della numerosità sono l'India, grazie alle informazioni provenienti da studi scientifici di ricercatori locali, l'Australia e il Sudafrica, tutti Paesi che hanno ospitato incidenti significativi[130].

Stato	Numero di dighe
India	59293
United States	55268
Canada	15977
Japan	12063
South Africa	10139
United Kingdom	3173
France	3052
Australia	2727
Spain	2505
Algeria	761

Tabella 27 - Numero di dighe per Stato

[130] Scarborough, Sahin, Porter, Stewart, «Long-term water supply planning in an Australian coastal city: Dams or desalination?»

Per quanto riguarda le grandi dighe, la cui distribuzione per Stato è già stata studiata nel capitolo relativo all'analisi del database ICOLD, si è scelto di rappresentare unicamente i primi dieci Stati per numero di incidenti, in modo da poter imbastire il calcolo della frequenza relativa (Tabella 27). Rimane ad esempio fuori il colosso mondiale della Cina, la cui segretezza industriale limita fortemente la diffusione di dati sugli incidenti (che tra l'altro il Paese tende a ridimensionare per evitare di mostrare le proprie debolezza sul panorama internazionale). Gli altri Paesi, al netto delle posizioni diverse, rimangono quelli tradizionalmente legati alla costruzione di dighe, come Canada, Giappone, USA e Francia.

Stato	Frequenza relativa
United States	5.83%
United Kingdom	3.75%
France	3.90%
India	0.06%
Australia	0.62%
South Africa	0.15%
Spain	0.44%
Japan	0.08%
Algeria	1.18%
Canada	0.04%

Tabella 28 - Frequenza relativa degli incidenti per Stato

La frequenza relativa degli incidenti dimostra ancora una volta come il bias territoriale porti a risultati irrealistici e dalla deviazione statistica notevole (Tabella 28). E' comunque interessante notare che la quota di USA, Francia e Regno Unito sembra essere in linea (anche se sicuramente molto maggiore del valore effettivo), segno che la rappresentazione relativa degli incidenti in questi Paesi potrebbe essere coerente. Gli altri Stati presentano invece una frequenza anche cento volte inferiore, compatibile con le stime mondiali. L'unico Paese sovrarappresentato risulta essere l'Algeria (Figura 109), non certo una potenza mondiale del settore, ma con i suoi 9 incidenti all'attivo nel database tende a superare l'1%[131].

Figura 109 - La Koudiat Dam in Algeria, facente parte del progetto di modernizzazione della rete idrica del Paese nordafricano

[131] Ouamane, «Dam engineering in Algeria: progress, needs and prospects»

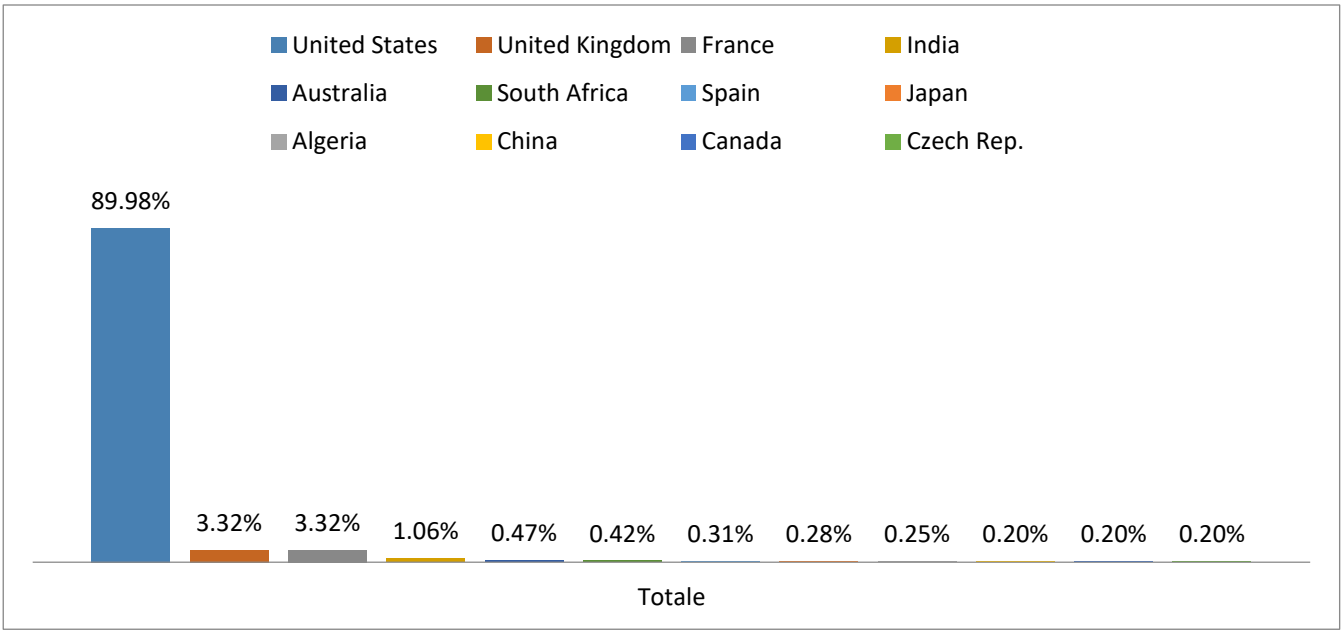


Figura 110 - Distribuzione percentuale degli incidenti per Stato

L'analisi Stato per Stato non fa altro che ribadire il bias legato agli USA nel database incidenti, figlio dell'ampia occorrenza di record estratti dalla banca dati NPDP (Figura 110). E' evidente come praticamente 9 incidenti su 10 siano attribuiti agli USA per questo motivo, mentre il dato di Francia e Regno Unito dipende a sua volta dalla presenza nel database di alcune centinaia di voci di incidente appartenenti rispettivamente a ARIA e alla British Dam Society. Diventa quindi evidente come la distribuzione territoriale degli incidenti, che per sua natura non può essere di certo esaustiva (al contrario, ad esempio, del database dighe ICOLD), sia da ritenersi fine a se stessa e indicativa al massimo dell'origine dei dati; il problema di fondo è legato all'interesse ancora tutto sommato contenuto che la comunità scientifica ha potuto dedicare al fenomeno degli incidenti in ambito di dighe e sbarramenti, monitorati con costanza da pochi decenni e per di più in maniera molto localizzata[132]. Soprattutto per quest'ultima ragione, la disponibilità di informazioni è legata principalmente alla volontà dei singoli Stati di indire campagne di monitoraggio del proprio parco dighe, come manifestato dall'ordine relativo dei primi dieci Stati per percentuale di incidenti: si tratta generalmente di realtà all'avanguardia che possono permettersi di investire risorse nello studio degli incidenti oppure che rivestono un'importanza geopolitica notevole; una condizione che non per forza va di pari passo con la densità di opere di invaso all'interno dei propri confini, come evidenziato più volte in precedenza. Analizzando nel dettaglio le rispettive distribuzioni emerge che:

- Per il database incidenti, oltre alla già citata preponderanza di record relativi agli USA (90%), i restanti dati provengono in massima parte da Francia e Regno Unito, le uniche due altre realtà ad aver compilato database sufficientemente nutriti da distinguersi rispetto agli altri. L'India può contare sull'articolo di … che le permette di approfondire la varietà degli incidenti, che altrimenti sono da attribuire principalmente al Bulletin 99 di ICOLD, il quale raccoglie circa 200 casi di incidenti da tutto il mondo, con un focus particolareggiato sui Paesi Europei (Spagna e Repubblica Ceca, quest'ultima anche oggetto di uno studio specifico a proposito di uno dei maggiori alluvioni che hanno colpito il Paese) e sulle realtà

[132] Federal Energy Regulatory Commission «Monitoring the Health of Dams»

più coinvolte dalla produzione di energia idroelettrica, ovvero Canada, Cina e Giappone. L'Australia si conferma sempre al centro degli studi in ambito di dighe e sbarramenti, mentre sorprende l'Algeria.

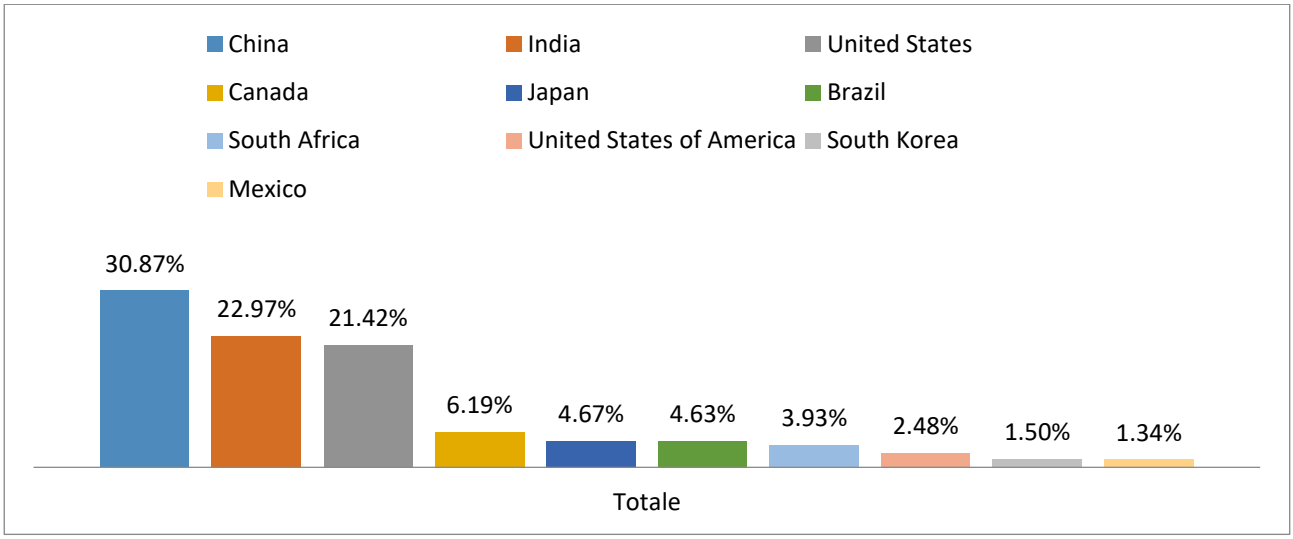


Figura 111 - Distribuzione percentuale delle dighe per Stato

- Nel database dighe la distribuzione appare molto più eterogenea (Figura 111), anche se una quota notevole di invasi è assorbita soltanto da Cina, India e USA, con una percentuale che oscilla tra il 20 e il 30% ciascuno. Si tratta di un riscontro compatibili con gli elementi acquisti finora. A seguire altri colossi dell'energia idroelettrica come Brasile e Canada, oppure realtà che hanno vissuto un intenso sviluppo tecnologico alla stregua di Giappone, Corea del Sud e Sudafrica, progresso che ha richiesto la progettazione di una rete di invasi a sostegno della produzione industriale e agricola. L'unico Paese europeo nella top ten è rappresentato dal Regno Unito, in virtù del suo equilibrio tra grandi e piccoli invasi che lo fa risaltare anche nel database complessivo (Figura 112). A chiudere il Messico, tradizionalmente allineato, al netto di qualche ulteriore limitazione, con il Sud degli USA quanto a diffusione di invasi.

Figura 112 - la Garreg Ddu Dam, una delle sei dighe che popolano la Elan Valley, in Galles

Ancora una volta, si approfondisce l'analisi mostrando i risultati circoscritti alle due casistiche di maggiore interesse: grandi e piccole dighe, con i consueti 15 metri di altezza a fare da discriminante.

Stato	Numero di piccole dighe
United States	55268
India	2152
China	2147
Canada	590
Brazil	427
South Africa	348
Japan	344
South Korea	149
Mexico	115
United Kingdom	104

Tabella 29 - Distribuzione delle piccole dighe per Stato

Siamo di fronte all'ormai annoso problema dell'occorrenza relativa dei dati sugli USA (Tabella 30), che tuttavia potrebbe tornare comoda vista l'analoga condizione all'interno del database incidenti, come si può notare nella seguente tabella:

Stato	Numero di incidenti di piccole dighe
United States	354
United Kingdom	29
Canada	3
India	2
Australia	2
Russia	1
Canada	1
Slovenia	1
Japan	1
Chile	1

Tabella 30 - Distribuzione degli incidenti di piccole dighe per Stato

Le piccole dighe risultano occupare soltanto un sesto circa del database incidenti, e per di più con una distribuzione percentuale fortemente tendente agli USA e in misura minore al Regno Unito. Per tutti gli altri Stati, a partire dal Canada e dall'India (che sicuramente sono teatro di un numero non così trascurabile di incidenti per gli invasi minori), non si supera le poche unità e metà dei primi dieci Stati mostrano un unico record (Tabella 30). Di conseguenza, va considerato che la successiva analisi sulla frequenza relativa degli incidenti presenterà delle inevitabili discrepanze interne.

Stato	Frequenza relativa incidenti
United States	0.64%
United Kingdom	27.88%
Canada	0.51%
India	0.09%
Australia	2.33%
Russia	Non pervenuto
Canada	0.17%
Slovenia	14.29%
Japan	0.29%
Chile	6.25%

Tabella 31 - Frequenza relativa degli incidenti di piccole dighe per Stato

A causa dei bias, che per quanto riguarda le piccole dighe intervengono sia lato incidenti che lato popolazione, alcune proporzioni appaiono largamente sovrastimate (Tabella 31). E' il caso del Regno Unito e della Slovenia, che a causa della presenza di numerosi incidenti a fronte di un numero limitato di dighe, arrivano a toccare rispettivamente quota 28% e 14%. Anche il Cile, che per la natura del suo territorio prevalentemente montuoso attira l'interesse della ricerca mondiale sulle dighe, raggiunge un esagerato 6%. Molto più interessanti risultano le proporzioni degli USA, che per una volta possono essere considerate quantomeno realistiche vista l'origine comune della maggior parte dei dati correlati in questa tabella (ovvero il database NPDP).

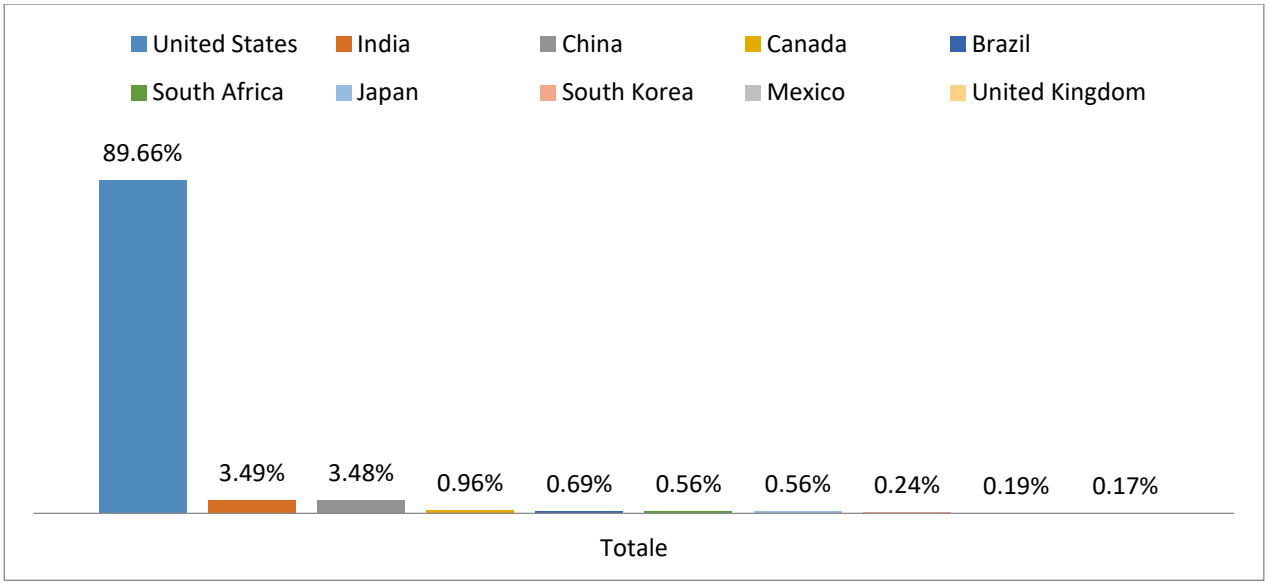


Figura 113 - Distribuzione percentuale delle piccole dighe per Stato

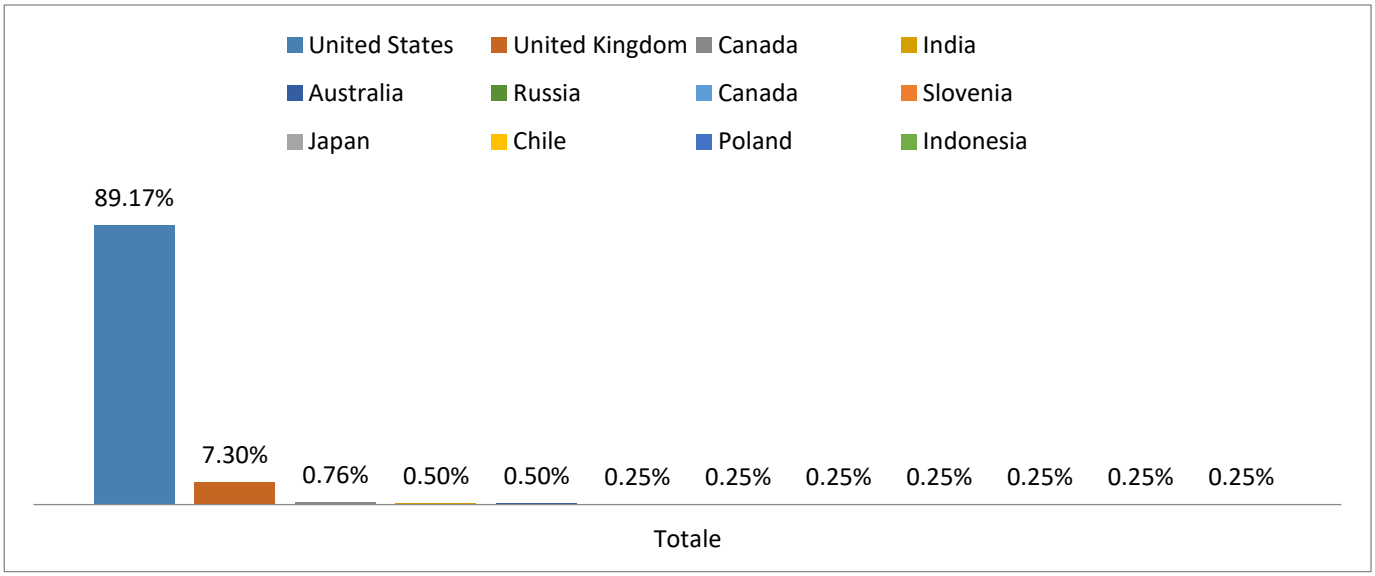


Figura 114 - Distribuzione percentuale degli incidenti di piccole dighe per Stato

Dal confronto si evince una notevole aderenza tra il tasso di incidenti negli USA (Figura 114) e l'occorrenza relativa di piccoli invasi (Figura 113), sempre all'interno dei confini statunitensi. Discorso diverso per le posizioni immediatamente successive: a livello di popolazione di piccole dighe troviamo i tradizionali Cina, India, Brasile[133], Canada, ecc… Mentre per quanto riguarda gli incidenti, nella top ten compaiono anche realtà tendenzialmente non così rinomate in ambito di invasi e sbarramenti: Slovenia, Polonia e Indonesia presentano un'occorrenza relativa non indifferente, soprattutto se paragonata con i Paesi che non siano USA o Regno Unito, per cui esistono ampi database compilati appositamente (l'assenza della Francia è dovuta alla mancanza di dati affidabili per quanto riguarda l'altezza all'interno del database ARIA, altrimenti piuttosto dettagliato). In questo caso, si tratta di una naturale conseguenza dell'interesse diversificato della Comunità Scientifica, che ha analizzato nel dettaglio gli eventi critici non su base geografica, bensì in base all'intensità e alla particolarità degli stessi (Figura 115).

Figura 115 - Conseguenze del collasso di una diga in Brasile

[133] Flavia Zimmermann, «Brazil's Latest Dam Disaster: Human Loss and Environmental Degradation»

Stato	Numero di grandi dighe
China	23841
United States of America	6395
India	3341
Japan	3119
South Korea	1297
South Africa	1091
Spain	1049
Turkey	958
Brazil	840
France	660

Tabella 32 - Numero di grandi dighe per Stato

Anche nell'ambito delle grandi dighe si registra una netta dicotomia tra la popolazione di invasi registrata da ICOLD e le percentuali di incidenti per Paese all'interno del database, cosa che di nuovo si spiega attraverso la preponderanza di record NPDP nello stesso (Tabella 32).

Stato	Numero di incidenti di grandi dighe
United States	2869
France	119
United Kingdom	90
India	36
South Africa	15
Australia	15
Spain	11
Algeria	9
Japan	9
Czech Rep.	7

Tabella 33 - Numero di incidenti di grandi dighe per Stato

La distribuzione degli incidenti di grandi dighe appare molto più eterogeneo e va a toccare realtà territoriali molto diverse tra loro (Tabella 33). Il problema, come si evincerà con la tabella seguente, riguarda la sovrarappresentazione dei dati per le grandi dighe, che conduce a frequenze relative altissime. Questo perché, in particolar modo per le realtà fotografate dai database più approfonditi (nell'ordine USA con NPDP, Francia con ARIA e Regno Unito con la British Dam Society e la Environment Agency UK), ci si concentra spesso anche sugli incidenti minori e, in particolar modo per NPDP, su criticità subite da invasi che sono successivamente crollati e quindi non sono più rappresentati in ICOLD. La suddivisione degli incidenti ricorda da vicino quella del database nella sua totalità, cosa che non stupisce se si considera che i dati "filtrati" da questo sono quelli delle piccole dighe che coinvolgono in maniera molto limitata gli stati al di fuori di USA e Regno Unito.

Stato	Frequenza relativa degli incidenti di grandi dighe
United States	44.86%
France	18.03%
United Kingdom	19.19%
India	1.08%
South Africa	1.37%
Australia	3.05%
Spain	1.05%
Algeria	7.14%
Japan	0.29%
Czech Rep.	6.36%

Tabella 34 - Frequenza relativa degli incidenti di grandi dighe per Stato

Come da attese, le frequenze relative per le grandi dighe tendono ad essere molto più elevate delle aspettative (Tabella 34). Spicca in particolare un valore prossimo al 50% per gli Stati Uniti: come a dire che una diga su due è interessata da incidenti. Si tratta di un valore che sarebbe di per sé anche accettabile se si stabilisse una definizione univoca di incidente, ovvero al di sopra di quale soglia di sicurezza sia consentito registrare il record[134]. Lo stesso dicasi per Francia e Regno Unito. Anche negli altri casi le percentuali appaiono piuttosto elevate, ad eccezione del Giappone tutte superiori all'1%. Tutto dipende naturalmente dall'entità e dall'appeal scientifico degli incidenti nel mondo, nonché dall'accessibilità dei dati (si ricorda ad esempio che nel caso delle piccole dighe, non esistono record sulle dighe russe a causa dei rapporti non idilliaci con gli Stati Uniti, i commissionari del database NPDP, mentre attraverso il database ARIA si è risaliti ad almeno un incidente in Russia).

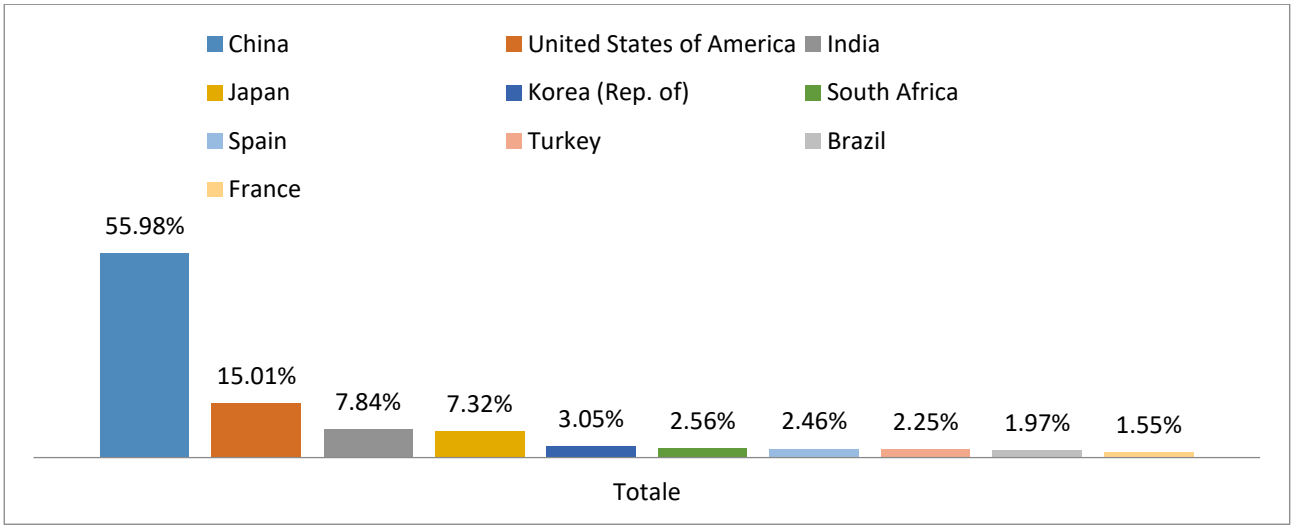


Figura 116 - Distribuzione percentuale delle grandi dighe per Stato

Risulta quindi più interessante, in prima battuta, eseguire un confronto tra l'occorrenza relativa per le piccole dighe e quella delle grandi (Figura 116 e Figura 117). Ad esempio, l'oscillazione resta minima per quanto riguarda gli USA, complice il numero elevatissimo di voci che frena grandi variazioni percentuali (contenute nell'ordine dell'1%, comunque pari a circa 500 elementi); il Regno Unito conserva il secondo posto pur perdendo alcuni punti percentuali, sintomo di un

[134] Dam Safety Committee «Dam Security»

maggiore focus sui piccoli invasi, che meglio si prestano a popolare il territorio britannico, costituendo al tempo stesso però un punto di debolezza della rete a causa dei minori controlli a cui sono sottoposti.

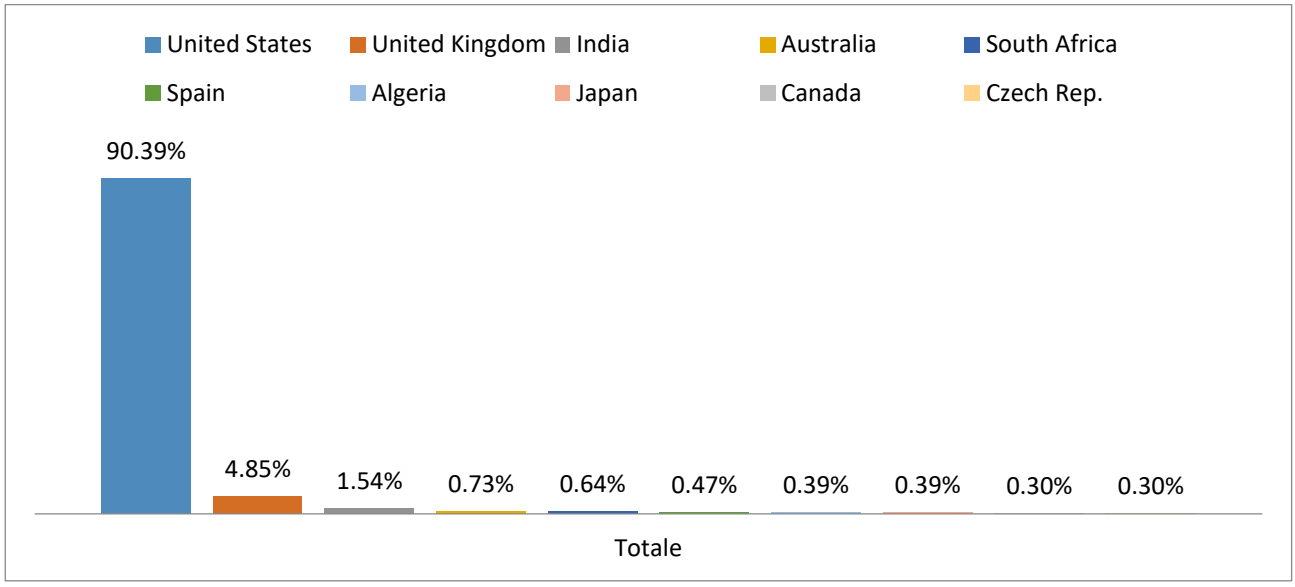


Figura 117 - Distribuzione percentuale degli incidenti delle grandi dighe per Stato

Il Canada sembra al contrario riservare particolare riguardo alla sicurezza dei grandi invasi rispetto a quanto avvenga per quelli più piccoli; Australia, India e Giappone si inseriscono invece più o meno nelle stesse posizioni, a ribadire come in queste realtà il livello di sicurezza medio non presenti grandi variazioni nel passaggio tra piccoli e grandi invasi. Anche la Spagna si inserisce nella top ten, mentre risultava assente per gli incidenti legati alle piccole dighe; al netto delle più volte citate approssimazioni di registrazione, questo ingresso potrebbe essere spiegato con la tendenza del Paese iberico a realizzare invasi di grandi dimensioni con tecnica Rockfill (per ragioni di disponibilità di materiale roccioso da costruzione sul territorio), che presenta tuttavia delle criticità non indifferenti rispetto ai bacini in cemento armato.

In conclusione, si può affermare che la suddivisione su base geografica del database degli incidenti presenta deviazioni statistiche di entità tale da pregiudicare un ulteriore approfondimento, che risulterebbe ben poco rappresentativo del reale stato dell'arte in materia di sicurezza idraulica. Si è comunque deciso di presentare i dati senza rimaneggiamenti o correzioni proprio nell'ottica di sottolineare i limiti attuali della conoscenza sugli incidenti di dighe e sbarramenti, ancora fortemente vincolati all'ambito statunitense[135]. Considerando in ogni caso che la banca dati NPDP risulta in sé piuttosto ampia e variegata, nonché tenendo conto delle differenze intrinseche dei 50 Stati che compongono gli USA, si ritiene che le successive correlazioni, slegate da connotazioni territoriali, possano risultare sufficientemente robuste anche a livello mondiale e saranno quindi oggetto di una disamina più dettagliata.

[135] NPDP, «NPDP database presentation»

4.1.3 Distribuzione per Tipologia Primaria

Tipologia primaria	Numero di dighe
Earth	223049
Unknown	42944
Gravity	23110
Rockfill	6702
Arch	3533
Buttress	1149
Barrage	927
Others	791
Multiple Arch	434

Tabella 35 - Suddivisione per Tipologia Primaria della popolazione mondiale di dighe

Una volta archiviato lo studio geografico, con tutti i suoi limiti, si può passare ad ambiti più significativi e meno influenzati direttamente dal bias territoriale, come ad esempio la Tipologia strutturale (Tabella 35). Come di consueto, si trascura la tipologia complessiva in quanto quest'ultima potrebbe presentarsi in forme miste difficilmente trattabili dal punto di vista statistico, preferendo piuttosto concentrarsi sulla tipologia primaria, che dà già di per sé un'indicazione significativa sulle caratteristiche meccaniche e ingegneristiche dell'opera. Non c'è da stupirsi se la tipologia più gettonata sia per larga misura quella "Earth", trattandosi di una modalità costruttiva molto importante dal punto di vista dei costi-benefici, che si adatta benissimo per le piccole dighe ma che non rimane la più frequente anche per gli invasi di dimensioni maggiori. Il gap con le alternative è evidente: più di 200 000 invasi realizzati in terra in tutto il globo (Figura 118), mentre le altre tipologie stentano a superare le 10 000 unità[136].

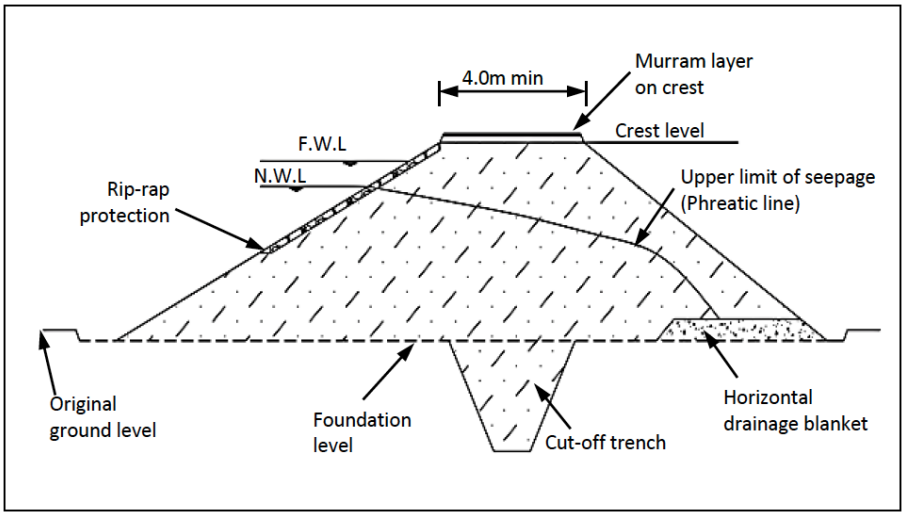


Figura 118 - Sezione tipica di una diga in terra omogenea

[136] Ghanbari, «Principles of Earth Dam Engineering»

E’ significativo notare che ben 40 000 dighe risultano di tipologia ignota, sintomo della difficoltà di accedere a dati approfonditi in ambito strutturale (spesso perché secretate per ragioni di spionaggio industriale o come difesa al Terrorismo[137]). L’unica tipologia oltre a quella in terra che presenta una popolazione notevole è da ricercare tra le dighe a gravità, che non a caso si prestano bene ad ospitare invasi ampi sia in altezza che in larghezza ad un costo relativamente contenuto. Le 6700 dighe Rockfill rappresentano un campione molto performante dal punto di vista strutturale ma di realizzazione complicata a causa della necessità di disporre in loco di pietra non porosa e sufficientemente resistente (Figura 119). Le dighe ad arco, sommando quelle singole alle multiple, non superano complessivamente le 5000 unità: si tratta di una conseguenza naturale della loro applicabilità preferenziale alle dighe più alte e a determinate condizioni geomorfologiche[138]. Per le tipologie restanti (nell’ordine di numerosità Buttress, Barrage e Others) la popolazione in media si attesta sulle mille unità, relegando queste tipologie strutturali a ruoli secondari e di nicchia, pur se con una modesta importanza a livello locale e per gli invasi più piccoli.

Figura 119 - Tipico aspetto di una diga rockfill con materiale prelevato in loco

[137] Alexander Shannon, «THE ECONOMICS OF DAM SECURITY POST 9/11 AND THE THREAT TO CONSUMER CONFIDENCE»
[138] Vitor da Silva, Eduardo Julio, «Design and Analysis of Arch Dams by the Membrane Method»

Etichette di riga	Conteggio di Tipologia primaria
Earth	1844
Unknown	1116
Concrete	226
Gravity	178
Rockfill	128
Masonry	64
Arch	33
Other	19
Timber Crib	17
Buttress	16
Stone	8
Embankment	8
Tailings	3
Multiple Arch	2
Rubber	1

Tabella 36 - Suddivisione per Tipologia Primaria degli incidenti

Passando alla visualizzazione della numerosità per gli incidenti, la gerarchia sembra essere rispettata (Tabella 36). In prima posizione si collocano le dighe in terra, ma molto più ravvicinante troviamo subito dietro le dighe di tipologia ignota (si tratta di un problema di registrazione, molto spesso i database e le pubblicazioni scientifiche omettono questo dettaglio e anche attraverso una ricerca più approfondita non si riesce ad arrivare ad un'informazione univoca). Le Rockfill risultano particolarmente rappresentate, in quanto pur non essendo così diffuse, costituiscono una categoria molto interessante in ottica di un'analisi strutturale. E' interessante infine notare come le dighe che in precedenza erano classificate come "Others" ora risultino scompattate in tipologie molto singolari (dalle dighe "Masonry" in mattone a quelle "Timber" in legno, passando anche per un improbabile diga in gomma-"Rubber"), sintomo di come in alcuni casi l'analisi degli incidenti si interroghi appositamente sulle realtà più peculiari.

Etichette di riga	Frequenza relativa
Earth	0.83%
Unknown	2.60%
Gravity	0.77%
Rockfill	1.91%
Arch	0.93%
Buttress	1.39%
Others	2.40%
Multiple Arch	0.46%

Tabella 37 - Frequenza relativa incidenti per Tipologia Primaria

Per ragioni di coerenza, è stata rappresentata unicamente la frequenza relativa delle tipologie immediatamente correlabili tra i due database (una volta appurato che si tratta di quelle più significative dal punto di vista della numerosità, Tabella 37). Emergono subito alcune tipologie che sembrano maggiormente sensibili agli incidenti: Rockfill e Buttress. Sicuramente ciò potrebbe essere dovuto al focus privilegiato nei confronti di tipologie particolari che altrimenti attirerebbero poco l'attenzione. Il valore elevato per Unknown e Others è da imputarsi più che altro alla loro

occorrenza relativa notevole all'interno del database incidenti, non certo per ragioni ingegneristiche. Curioso il dato della tipologia in terra: la frequenza relativa si mantiene nettamente al di sotto dell'1%, malgrado una naturale predisposizione alle criticità strutturali; è altrettanto vero che conoscendo i limiti di sicurezza di tale tipologia, negli ultimi anni è sicuramente aumentata l'attenzione verso questa tipologia.

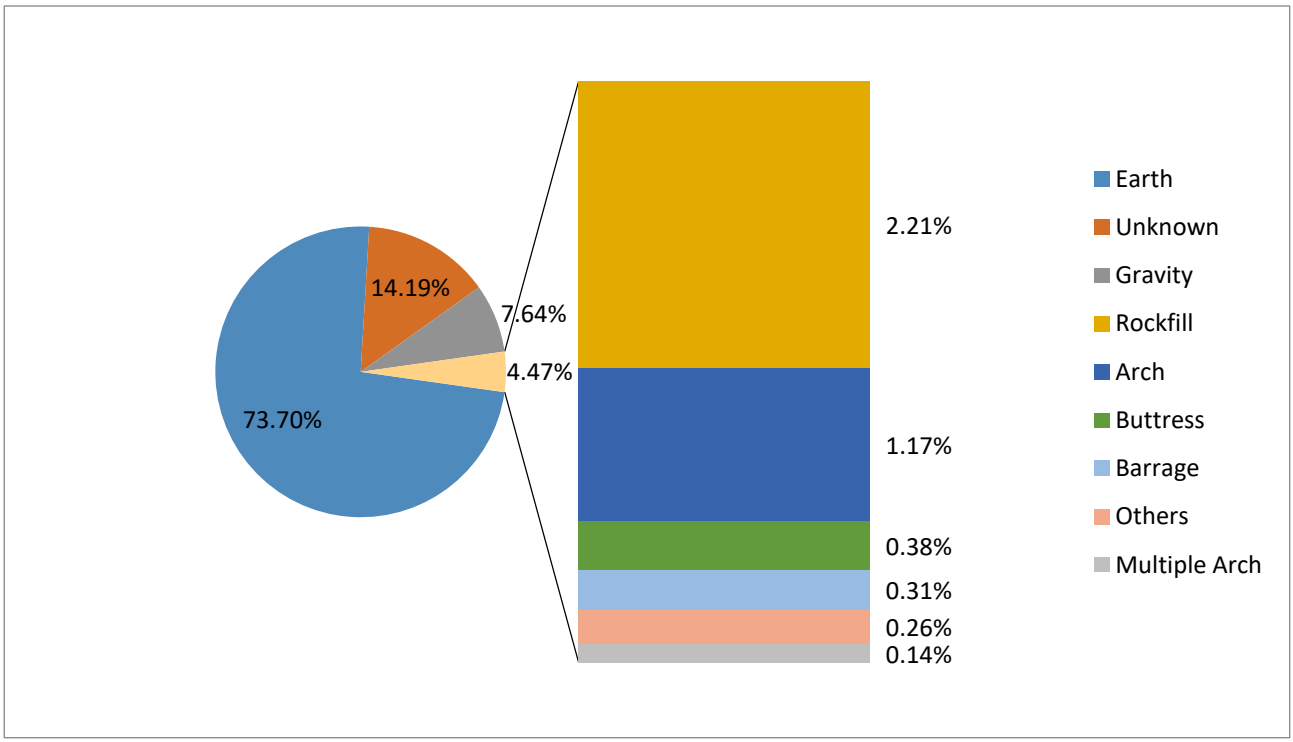


Figura 120 - Percentuale di dighe per Tipologia Primaria

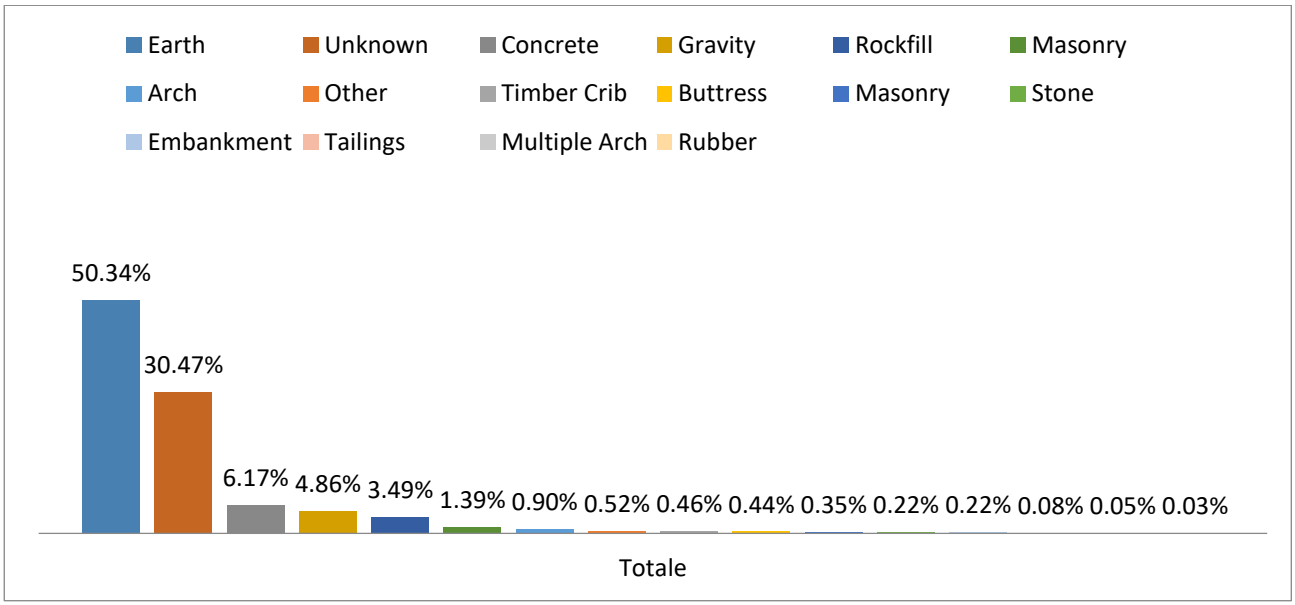


Figura 121 - Percentuale di incidenti per Tipologia Primaria

In prima battuta, si evince come se non altro la collocazione delle varie tipologie per i due database segua a grandi linee lo stesso ordine, sintomo quindi di una distribuzione piuttosto realistica degli incidenti (che rimane l'incognita maggiore, visto l'appartenenza privilegiata agli USA). In entrambi i casi, infatti, sono le dighe in terra a posizionarsi al primo posto, pur se con percentuali relativamente diverse (Figura 120 e Figura 121): se quasi 3 dighe su 4 risultano realizzate in terra a livello mondiale, soltanto poco più di 1 su 2 sembra essere coinvolta da un incidente. Questa situazione si può spiegare in più modi:

- Normalmente, le dighe in terra dovrebbero rappresentare l'alternativa più economica e disponibile in loco senza importazione di materiale più pregiato. Di conseguenza, se da un lato costituiscono un'ottima opportunità in un rapporto costi-benefici, se ci si limita ad analizzare esclusivamente il lato sicurezza emergono notevoli criticità, in quanto esse tendono ad essere particolarmente sensibili ai problemi principali che attanagliano dighe e sbarramenti, ovvero Overtopping. Internal Erosion e Earthquake. Il fatto che, contrariamente alle aspettative, l'occorrenza relativa degli incidenti sia più bassa, potrebbe paradossalmente essere legato alla coscienza di queste debolezze strutturali e al conseguente monitoraggio maggiore riservato agli invasi in terra[139].
- Più realisticamente, si torna a parlare delle modalità di registrazione degli incidenti: trattandosi di database e studi scientifici di una certa caratura, essi tendono involontariamente a concentrarsi sui casi di grandi eventi dannosi, i quali coinvolgono con maggiore frequenza grandi invasi costruiti con altri materiali (cemento principalmente, eventualmente roccia). E' quindi possibile che le dighe in terra effettivamente colpite da incidenti non possano contare su un'adeguata rappresentanza nelle banche dati di origine e di conseguenza all'interno di quella realizzata appositamente per il presente studio. Tale possibilità potrebbe risultare più chiara dall'analisi separata di piccole e grandi dighe che verrà svolta di seguito

Sia per quanto riguarda la popolazione di dighe che il numero di incidenti, al secondo posto si trovano i record ignoti, a dimostrazione di come sia necessario dedicare ancora molto lavoro allo studio di questo fenomeno, in particolar modo se si considera che la quota di invasi di tipologia non nota non supera comunque il 15 %, mentre quella dei bacini di natura sconosciuta coinvolti da un incidente (di cui paradossalmente si conoscono altre caratteristiche meno evidenti) supera il 30%. In quest'ultimo caso, va sottolineato che alcune banche dati, come ARIA, non offrono pressoché alcuna informazione a proposito delle caratteristiche strutturali delle opere coinvolte, cosa che contribuisce sicuramente ad innalzare questa percentuale. A seguire ancora troviamo le dighe in calcestruzzo, che all'interno del database incidenti sono ancora suddivise in "Gravity" e "Concrete"; contrariamente a quanto affermato nell'assemblaggio del database complessivo delle dighe, si è deciso di non fondere le due categorie, in quanto a livello di meccanica di incidenti (e quindi nell'ambito del successivo confronto con la tipologia di evento) potrebbero presentare comportamenti significativamente diversi. La differenza tra i due database rimane confinata al di sotto di pochi punti percentuali, quindi non si registra una maggiore sensibilità di questa tipologia strutturale alle criticità. Lo stesso dicasi per le dighe "Rockfill", che presentano una percentuale del 3,5% per le dighe coinvolte da incidenti e del 2,2% a livello di rappresentanza in seno alla popolazione mondiale. La tipologia Masonry, come illustrato nel capitolo relativo all'assemblaggio del database complessivo dighe, sono stati integrati nella dicitura "Others", e la percentuale tutto

[139] Fernandez, Rodriguez, Mendez, «Earth Dam Monitoring in the Soil Take Care Project»

sommato limitata in ambito incidenti conferma che non si tratta di una tipologia così interessata dai fenomeni da meritarsi una categoria indipendente. L'unica alta tipologia che presenti un'occorrenza superiore allo 0,5% è quella ad Arco, con una quota del tutto simile alla percentuale di popolazione a livello mondiale, segno che le dighe ad arco non presentano particolari sensibilità agli incidenti, malgrado possano avere visibilità maggiore nell'immaginario collettivo a causa della loro struttura imponente e la capacità di invaso notevole (con conseguente aumento del rischio a valle). Discorso simile per le tipologie "Buttress", "Multiple Arch" e "Barrage", poco rappresentate sia a livello di dighe che di incidenti. Si sottolinea comunque la presenza, nel database dighe, di tipologie molto rare quali le "Timber", per cui si ribadisce l'intenzione di conservare la categoria nell'ottica di verificare la loro eventuale predisposizione nei confronti di determinate tipologie di evento critico. Le quote di "Stone" (comunque assimilabile al Rockfill) e "Rubber" risultano assolutamente trascurabili, significative eventualmente come case studies a sé stanti ma comunque di difficile approfondimento a causa della loro occorrenza relativa tendente allo zero.

Come di consueto, si aumenta il grado di dettaglio dell'analisi attraverso una suddivisione del confronto tra grandi e piccole dighe, anche al fine di saggiare la robustezza dei singoli database dighe e quella intrinseca della banca dati degli incidenti.

Tipologia Primaria	Numero di piccole dighe
Earth	51743
Concrete	1357
Gravity	1270
Rockfill	797
Unknown	195
Other	185
Masonry	182
Stone	129
Buttress	105
Arch	84
Timber Crib	27
Barrage	27
Multiple Arch	16

Figura 122 - Numero di piccole dighe per Tipologia Primaria

Come è lecito attendersi, sulle piccole dighe la prevalenza degli invasi in terra è estremamente netta: più di 50000 casi registrati, mentre in seconda posizione troviamo le dighe in CLS con appena 1300 unità (Figura 122). E' in linea con le aspettative in quanto i bacini con altezza inferiore ai 15 metri sono effettivamente realizzati nella maggior parte dei casi in terra, in quanto si tratta del miglior compromesso tra efficienza e costi contenuti; inoltre, l'altezza limitata (e con essa la capacità di invaso ugualmente circoscritta a valori minori di quelli delle grandi dighe) non impone soluzioni ingegneristiche troppo avveniristiche come invece potrebbero essere le dighe ad arco, che non a caso sono relegata in fondo alla classifica con cento casi complessivi. Le uniche altre tipologie degne di nota, con una numerosità intorno alle 1000 unita, sono le dighe in CLS, a gravità e Rockfill, che possono dimostrarsi più indicate della terra compattata in corrispondenza di precise esigenze e configurazioni territoriali.

Tipologia Primaria	Conteggio di Tipologia primaria
Earth	1196
Unknown	151
Concrete	130
Gravity	108
Rockfill	51
Masonry	33
Timber Crib	12
Other	11
Arch	9
Stone	6
Buttress	5
Embankment	2

Figura 123 - Numero di incidenti di piccole dighe per Tipologia Primaria

Pur se con proporzioni leggermente diverse, la distribuzione tipologica degli incidenti conserva il trend delle piccole dighe (Figura 123): invasi in terra in pole position e molto staccate le dighe Concrete, Gravity e Rockfill, con le altre tipologie, in particolare quelle più imponenti (ad arco e Buttress) che faticano a superare la decina di record.

Tipologia Primaria	Frequenza relativa incidenti
Earth	2.31%
Unknown	77.44%
Concrete	9.58%
Gravity	8.50%
Rockfill	6.40%
Masonry	18.13%
Timber Crib	44.44%
Other	5.95%
Arch	10.71%

Figura 124 - Frequenza relativa degli incidenti di piccole dighe per Tipologia Primaria

Se si va sulla frequenza relativa degli incidenti divisi per tipologia strutturale, si individuano immediatamente dei valori sensibilmente elevati che derivano da una sovrarappresentazione all'interno del database incidenti, in particolare per quelle tipologie poco diffuse effettivamente ma che per la loro natura singolare tendono ad attrarre attenzione da parte dei media e della comunità scientifica (Figura 124): ad esempio, Masonry e Timber[140]. L'elevata occorrenza relativa delle piccole dighe ad arco si può spiegare in maniera analoga, ma anche facendo riferimento a come sia una tipologia più adatta ai grandi invasi, e che quindi può paradossalmente andare in crisi per strutture di dimensioni più contenute. A dire il vero, tutte le frequenze sembrano decisamente superiori alle aspettative, conseguenza inevitabile di una popolazione di piccole dighe probabilmente leggermente sottostimata.

[140]Akidoye, «Dams: Providing and Destroying Water Security?»

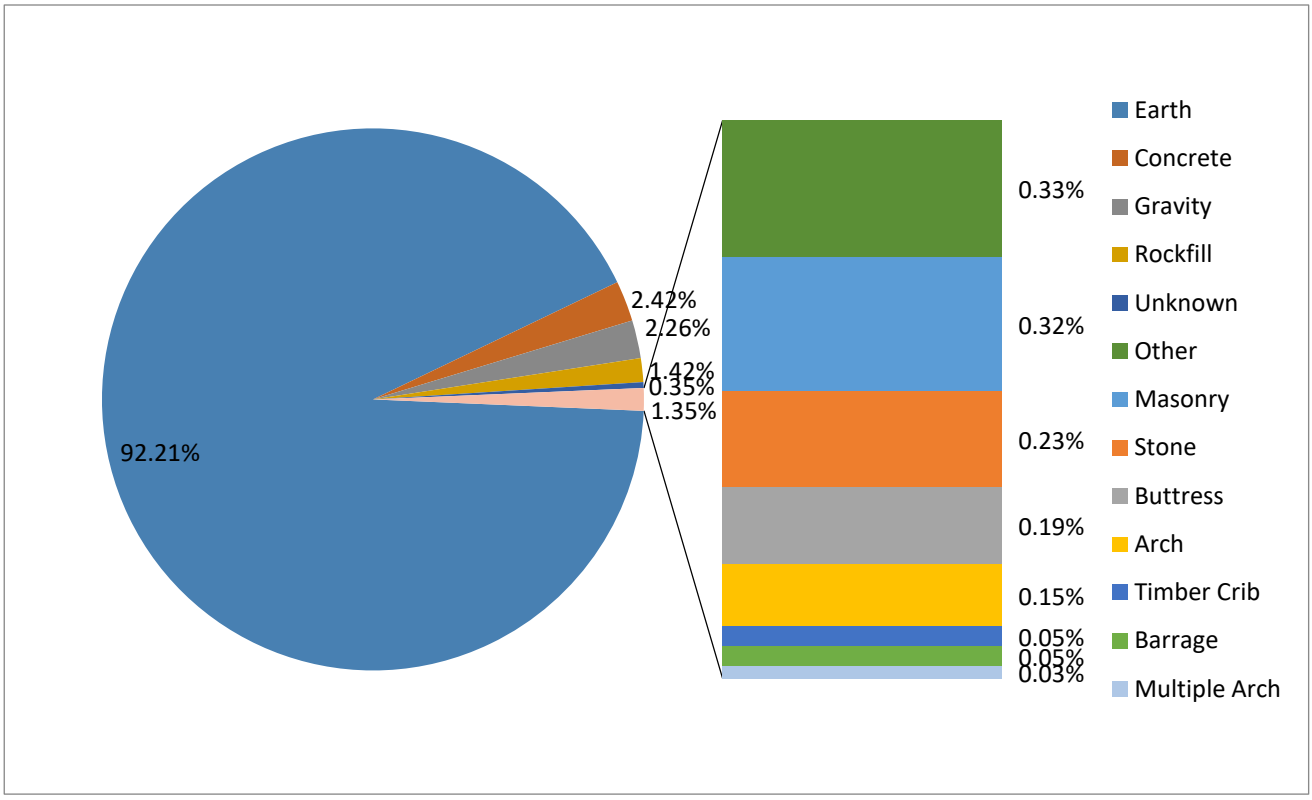


Figura 125 - Suddivisione percentuale delle piccole dighe per Tipologia Primaria

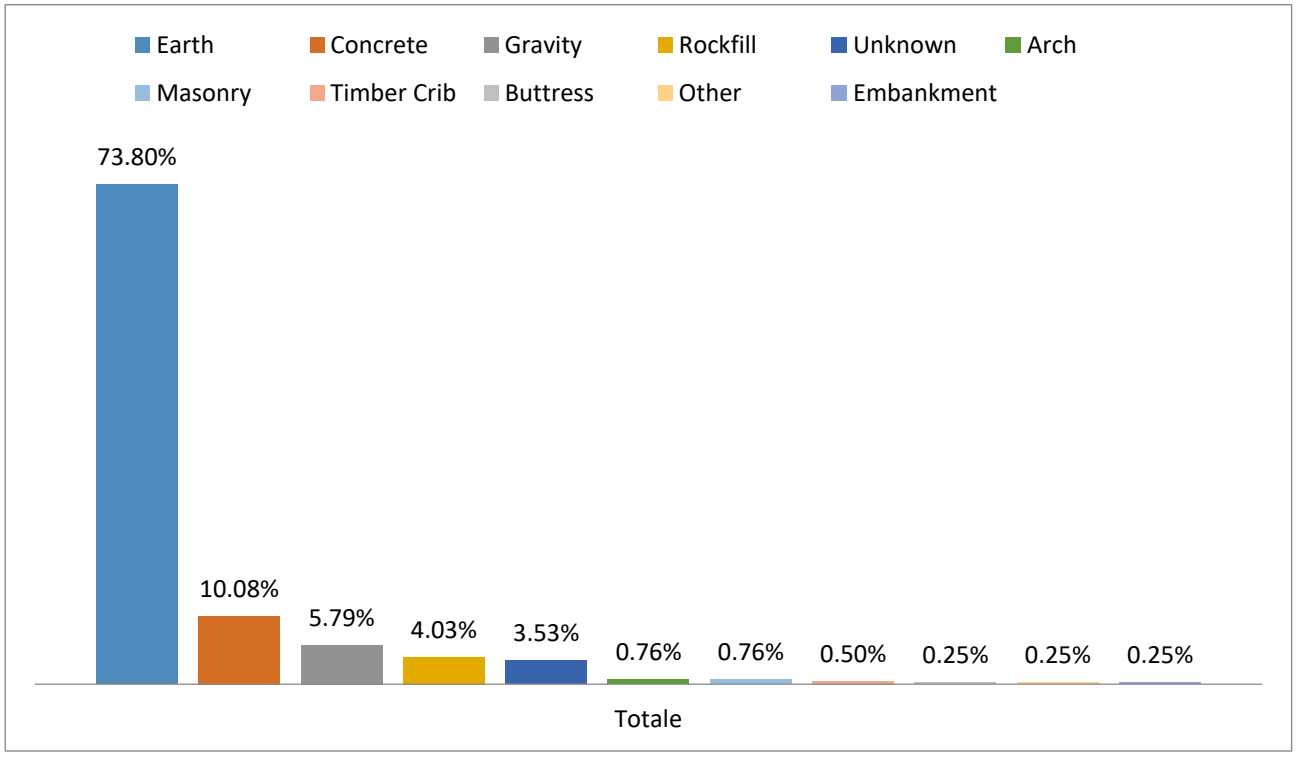


Figura 126 - Suddivisione percentuale degli incidenti di piccole dighe per tipologia primaria

Se ci si limita agli invasi di altezza inferiore ai 15 metri, per quanto riguarda le dighe in terra la correlazione appare simile ma diverse nelle percentuali (Figura 125 e Figura 126): nello specifico, la quota di incidenti per le dighe in terra è di circa 20% inferiore rispetto alla popolazione stimata, ma in questo caso si parla di un ragguardevole 74% di incidenti e un elevatissimo 92% di occorrenza relativa per i bacini con paramento in terra. Ciò non deve stupire in quanto, per altezze contenute, la tipologia "Earth" costituisce una delle alternative più ottimizzare, fenomeno che verrà ribadito dall'occorrenza estremamente contenuta invece delle tipologie più massicce e imponenti, quali Buttress o Arch[141]. Si sottolinea poi che per le Small Dams le tipologia non nota risulta molto meno frequente, sintomo di un accesso più dettagliato e ampio alle informazioni a riguardo, cosa che consente di ridurre la quota di tipologia di dighe coinvolti in incidenti, di tipologia ignota al di sotto del 4%. In compenso, si raggiunge una non trascurabile percentuale del 10 % di incidenti registrati per dighe "Concrete", che sommate al 6% circa di "Gravity" porta la combinazione di queste due tipologie a mostrare una maggiore predisposizione agli incidenti rispetto a quello che ci si aspetterebbe guardando la popolazione relativa nel mondo. Sulle tipologie meno diffuse vi è un sostanziale parallelismo tra l'occorrenza e la predisposizione a subire incidenti, cosa che potrebbe comunque derivare da una limitata disponibilità di dati e dalla volontà, visto lo scarso numero di record, di indagare con particolare approfondimento i pochi casi a disposizione.

Tipologia Primaria	Numero di grandi dighe
Earth	32956
Gravity	6008
Unlisted	5976
Rockfill	2926
Arch	2199
Others	397
Buttress	344
Barrage	225
Multiple Arch	118

Tabella 38 - Numero di grandi dighe per Tipologia Primaria

In ambito di grandi dighe, le posizioni relative rimangono pressoché immutate (Tabella 38), segno che vi è una sostanziale omogeneità nella scelta della tipologia a prescindere dall'altezza, ad esclusione delle tipologie che effettivamente si dimostrano più o meno performanti al variare delle dimensioni degli invasi (dighe ad arco in primis, che non a caso guadagnano parecchie posizioni e si collocano a metà classifiche con circa 2000 unità).

[141] Svensen, «Numerical analyses of concrete buttress dams to design dam monitoring »

Tipologia Primaria	Numero di incidenti di grandi dighe
Earth	414
Concrete	80
Rockfill	70
Gravity	57
Arch	23
Unknown	15
Masonry	12
Buttress	10
Embankment	6
Masonry	5
Other	3
Tailings	2
Multiple Arch	2
Rubber	1

Tabella 39 - Numero di incidenti di grandi dighe per Tipologia Primaria

La configurazione della popolazione di grandi dighe si ripercuote sulla distribuzione degli incidenti, cosa che fa immaginare anche una suddivisione relativamente regolare della frequenza degli incidenti (Tabella 39).

Tipologia Primaria	Frequenza relativa incidenti
Earth	1.26%
Gravity	0.95%
Unlisted	0.25%
Rockfill	2.39%
Arch	1.05%
Others	0.76%
Buttress	2.91%
Multiple Arch	1.69%

Tabella 40 - Frequenza relativa degli incidenti di grandi dighe per Tipologia Primaria

In effetti, quest'ultima rimane sempre contenuta al di sotto del 3% e nella maggior parte dei casi intorno all'1% (Tabella 40). Le dighe che sembrano meno sicure, in quanto più largamente soggette ad incidenti, sono nell'ordine quelle Buttress (ma in questo caso potrebbe trattarsi di un problema di sovrarappresentazione), le Rockfill a causa della necessità di fare ricorso a pietra di buona qualità, non sempre disponibile in cantiere, e le dighe in terra, che possono entrare in crisi per altezze elevate.

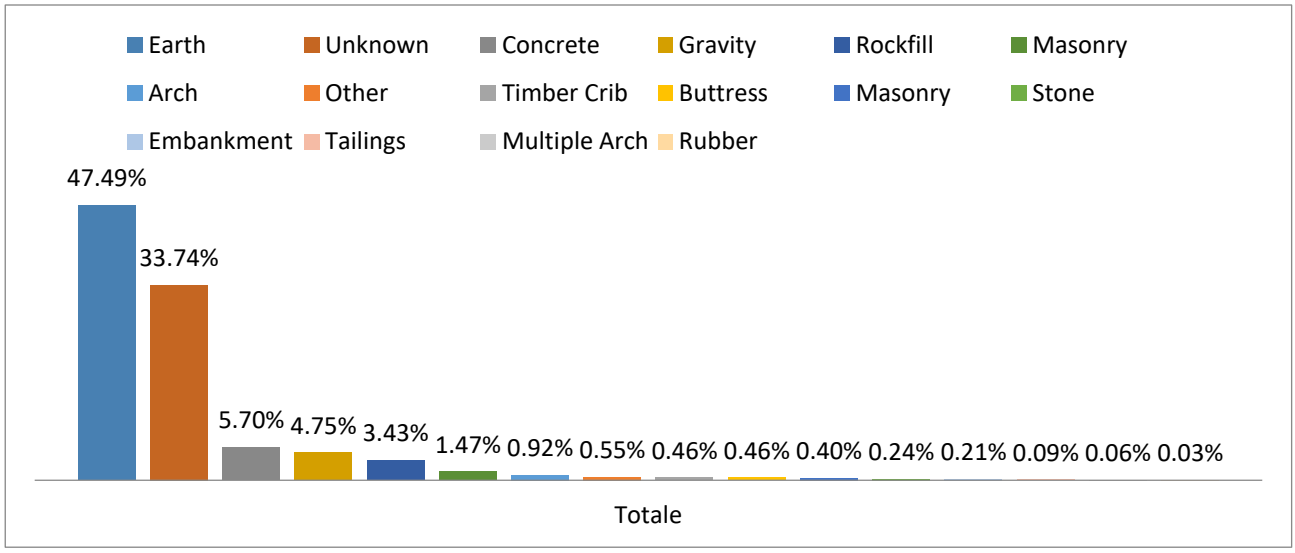


Figura 127 - Suddivisione percentuale degli incidenti di grandi dighe per Tipologia Primaria

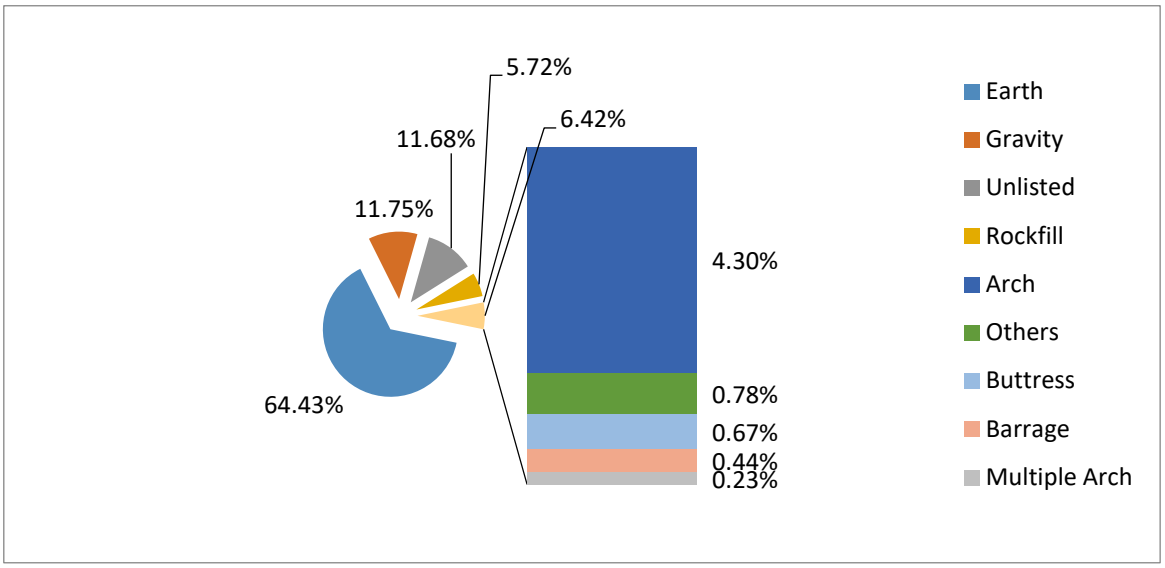


Figura 128 - Suddivisione percentuale delle grandi dighe per Tipologia Primaria

Il trend delle grandi dighe sembra confermare le osservazioni precedenti: le dighe in terra sarebbero meno inclini a subire incidenti, pur restando a livello assoluto la tipologia maggiormente colpita (Figura 127 e Figura 128). Sulle grandi dighe permane una notevole incertezza relativa ad una buona parte dei record, ovvero più di una diga su tre risulta non registrata in termini di tipologia, mentre a livello di incidenti tale percentuale scende ad un più rassicurante 11,68%. Va sottolineata l'elevata percentuale di incidenti per le dighe ad arco, che per quanto contenuta a livello assoluto (4%) diventa quasi quattro volte l'occorrenza relativa di questa tipologia a livello mondiale. Si tratta di un segnale di debolezza intrinseca di questo tipo di bacini, che tra l'altro spesso risultano quelli con l'invaso maggiore e quindi un rischio non indifferente, ma al tempo stesso potrebbe spiegarsi anche con l'interesse particolareggiato da parte degli analisti di incidenti per le dighe ad arco, visto il loro notevole impatto economico e le già citate ricadute dannose sull'ambiente circostante in caso

di incidente[142]. In maniera del tutto proporzionale si registra una disproporzione significativa tra la popolazione di dighe ad arco multiplo e la loro presenza nel database incidenti, con un rapporto pressoché costante di 1 a 4: un'ulteriore conferma della loro inevitabile sensibilità agli incidenti, vista anche la loro mole e una struttura molto diversificata internamente (e di conseguenza soggetta a numerose criticità diverse). Si evidenziano poi altri particolari notevoli, come un'occorrenza relativa di grandi dighe "Masonry" soggette ad incidenti, normalmente poco diffuse, che per quanto riguarda gli invasi superiori ai 15 metri raggiungono una quota relativamente alta, ovvero di 1,5%; non è un caso che si tratta di una tipologia strutturale in forte disuso, in quanto non offre particolari garanzie a livello di sicurezza senza compensare con un costo così ridotto rispetto ad altre tipologie strutturali più solide. Curiosa infine la presenza di incidenti occorsi a dighe "Rubber", ovvero realizzate in gomma (ovviamente di natura polimerica ed adeguatamente trattata per assicurarne l'impermeabilità); per di più, esse non compaiono nella sezione del database incidenti con altezza inferiore ai 15 metri, una caratteristica che meglio si assocerebbe ad una tipologia strutturale così ardita.

4.1.4 Distribuzione per Anno di Costruzione

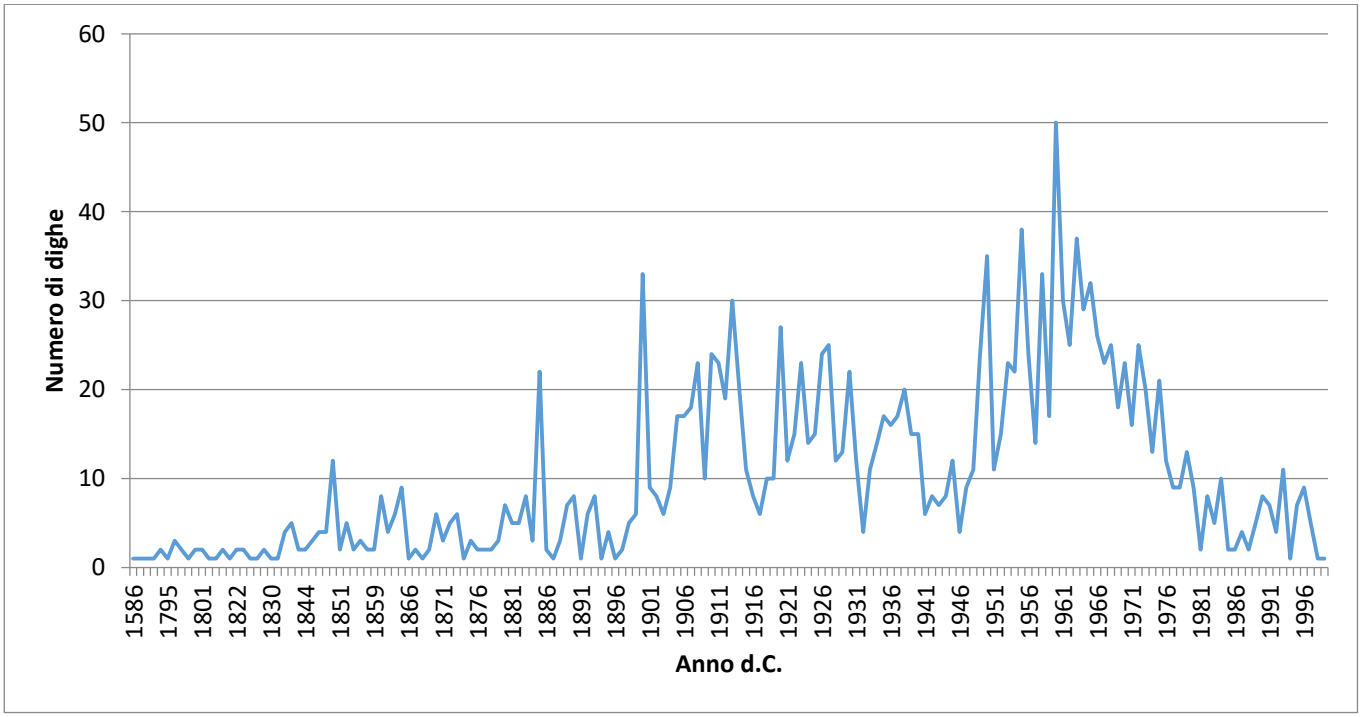


Figura 129 - Distribuzione temporale dell'anno di costruzione per le dighe coinvolte da incidenti

L'anno di prima costruzione è una variabile che riveste un ruolo assolutamente non secondario nell'ottica di un'analisi della distribuzione degli incidenti (Figura 129). Questo perché permette di fotografare il rapporto tra progresso tecnologico (ipotizzando, naturalmente, che quest'ultimo proceda di pari passo con lo scorrere del tempo, situazione pressoché inevitabile dal Medioevo in poi, quindi ben prima del record più antico che si ha a disposizione, costruito nel 1586) e occorrenza relativa degli incidenti. Naturalmente, un numero maggiore di voci in un determinato arco temporale non significa forzatamente che quel periodo storico si riveli più critico in termini di

[142] Shafai, «Individual Project 4 Design Criteria and Failure Modes for Concrete Gravity and Arch Dams»

sicurezza delle dighe: potrebbe essere legato semplicemente ad un aumento sensibile della densità di invasi con conseguente incremento degli incidenti, magari in maniera molto meno proporzionale all'effettiva popolazione di dighe. Per poter operare questo tipo di raffronto, sarebbe tuttavia necessario disporre di dati continui e affidabili sull'anno di costruzione delle dighe, cosa che purtroppo avviene unicamente per la banca dati ICOLD, e quindi, per ragioni di coerenza interna, non è stata implementata nel database complessivo per evitare discordanze statistiche rispetto ai dati provenienti da NPDP. Ci si limiterà quindi a studiare il grafico temporale degli incidenti in maniera indipendente, avendo comunque l'accortezza di relativizzare i dati, se non direttamente con un'evidenza statistica, perlomeno con nozioni tecnico-scientifiche già acquisite nel corso del presente studio, oppure frutto di un approfondimento specifico all'interno di questo paragrafo.

Alla luce di quanto precisato nelle righe immediatamente precedenti, è comunque possibile procedere ad un'analisi dell'andamento temporale per l'anno di costruzione di tutte le dighe inserite nel database incidenti. È possibile immediatamente notare come vi sia un andamento pressoché costante a partire dal primo dato (XVI secolo) fino a circa il 1830, con un plateau dell'ordine di un o due incidenti (massimi) all'anno. Ovviamente tale distribuzione non va interpretata come un sintomo di forte interesse per la sicurezza delle opere idriche, che al contrario in questo arco temporale vengono edificate con tecniche artigianali e basate principalmente sull'esperienza empirica dei progettisti. Il primo picco, pur se di altezza ancora contenuta, si situa intorno alla metà del 1800, in corrispondenza della prima grande ondata di costruzione dei grandi invasi, in particolar modo negli USA e nei Paesi europei già interessati da tempo dalla Rivoluzione Industriale. Si tratta di un aumento repentino che evidenzia al tempo stesso l'assenza di precisi standard di sicurezza elementari, che saranno invece adottati progressivamente negli anni successivi, al punto tale che nel corso della seconda metà del secolo, malgrado una naturale diffusione degli invasi in tutto l'Occidente, la quota annuale di incidenti si mantiene al di sotto del primo picco (ovvero pari ad una decina di eventi); questo fino al 1885, anno che fa registrare un secondo picco di altezza doppia a quello precedente, ancora una volta sulla scia della campagna di costruzione di dighe e sbarramenti, con ulteriore superamento dell'asticella del rischio ingegneristico (è il periodo delle prime dighe massicce, in particolar modo in Nordamerica). Potrebbe tuttavia trattarsi unicamente di un fenomeno aleatorio, in quanto fino all'inizio del XX secolo la quota annuale di incidenti si riporta ai livelli antecedenti a questa data. Il 1900 corrisponde all'instaurarsi di un nuovo plateau ad una quota compresa tra i 20 e i 30 incidenti all'anno (si esclude il valore estremo dell'anno 1900 in quanto da attribuire sicuramente ad approssimazioni di registrazione per dighe costruite negli anni intorno a questa data), che al netto di inevitabili oscillazioni statistiche, sembra tracciare un trend leggermente decrescente fino alla metà del secolo, complici sicuramente le migliori precauzioni di sicurezze emerse grazie al concomitante sviluppo tecnologico dal forte impulso. Va inoltre sottolineato come si registrino due picchi molto bassi durante altrettanti periodi storici estremamente significativi: 1914-1918 e 1939-1945, i quali corrispondono naturalmente alle due Guerre Mondiali, archi temporali che hanno visto una rapida riconversione della produzione industriale all'ambito bellico (e una parallela riallocazione di fondi e risorse verso settori direttamente coinvolti dall'esercito, cosa che non riguarda tendenzialmente le dighe) per la maggior parte delle nazioni coinvolte, nonché inevitabili arresti delle campagne di costruzione all'interno dei Paesi occupati o teatro dei combattimenti. Il picco maggiore di tutto il database è rintracciabile, infatti, nel secondo Dopoguerra, quando grazie al Boom economico e alla relativa condizione di pace internazionale (al netto di alcuni conflitti secondari della Guerra Fredda, peraltro combattuti in zone del mondo dallo scarso sviluppo tecnologico) si registra un aumento repentino della costruzione di dighe, a cui almeno inizialmente deve corrispondere una crescita significativa degli

incidenti, almeno fino alla metà degli anni ’60, con l’introduzione di materiali innovativi e più performanti e l’integrazione di un design di sicurezza decisamente più all’avanguardia; a partire da questo periodo, il calo delle dighe interessate da incidenti diventa inesorabile fino agli anni ’80, quando raggiunge un valore costante (in media) di circa 5 incidenti all’anno, una volta raggiunti gli standard di sicurezza più elevati e difficilmente migliorabili. Va anche detto che a partire dagli ultimi anni del ‘900 vedono, come già rilevato nelle analisi precedenti relative alla sola popolazione di dighe, si sia verificata diminuzione notevole nella costruzione di nuovi invasi, privilegiando piuttosto la messa a norma e l’efficientamento di quelli esistenti[143].

Come anticipato in precedenza, risulta impossibile, a livello di disponibilità di dati, operare un confronto con il database complessivo delle dighe, a causa della mancanza di informazioni riguardanti l’anno di costruzione per le dighe più piccole. In maniera identica, non è possibile procedere con una correlazione tra queste ultime e la porzione di incidenti sulle dighe al di sotto dei 15 metri, di cui si presenta piuttosto l’andamento temporale nell’ottica di relazionarlo con l’equivalente per le grandi dighe; quest’ultimo, al contrario, ha la possibilità di essere messo in relazione con i dati affidabili sulle grandi dighe emessi da ICOLD.

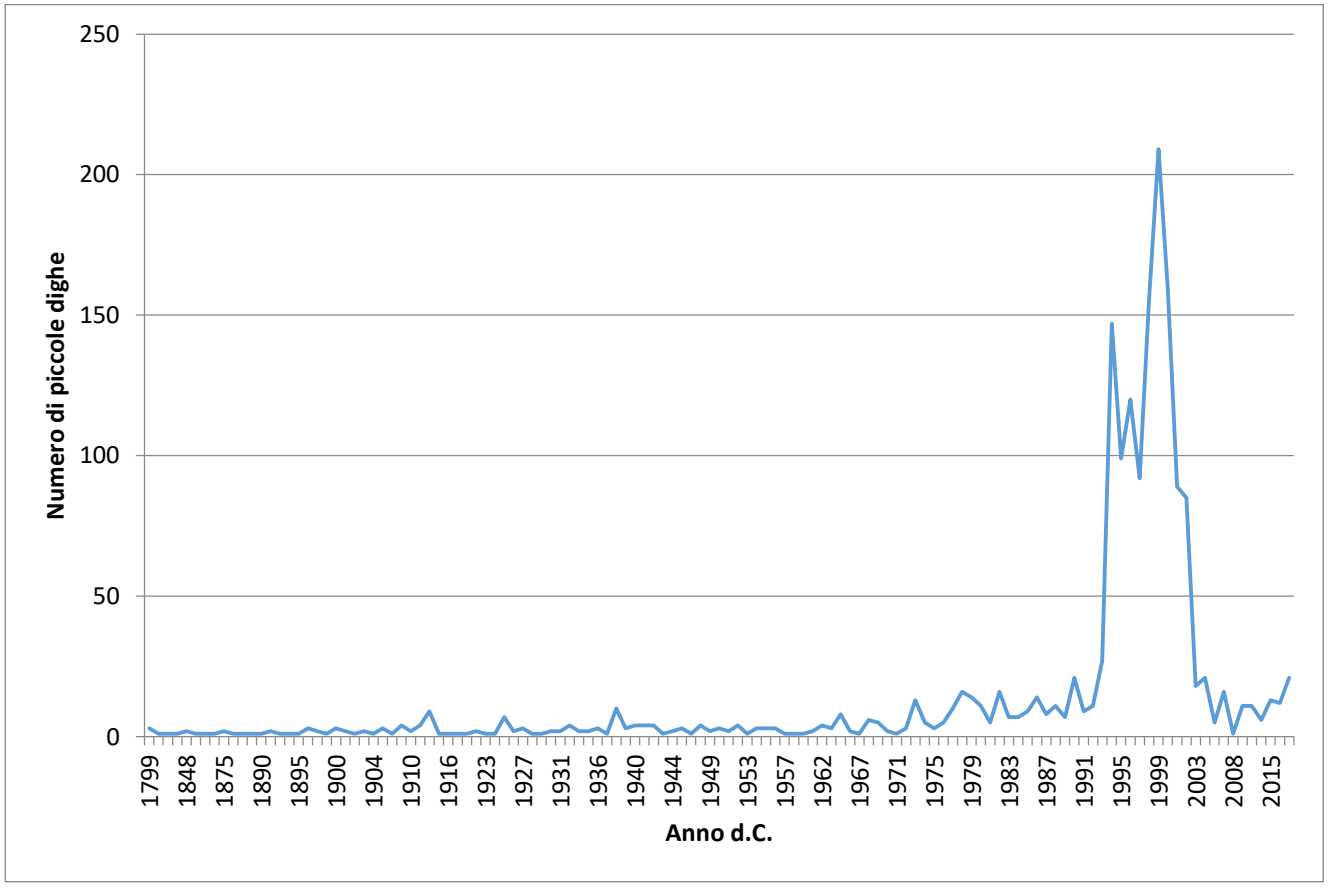


Figura 130 - Distribuzione temporale dell'anno di costruzione delle piccole dighe coinvolte da incidenti

[143] Altinbilek, «The Role of Dams in Development»

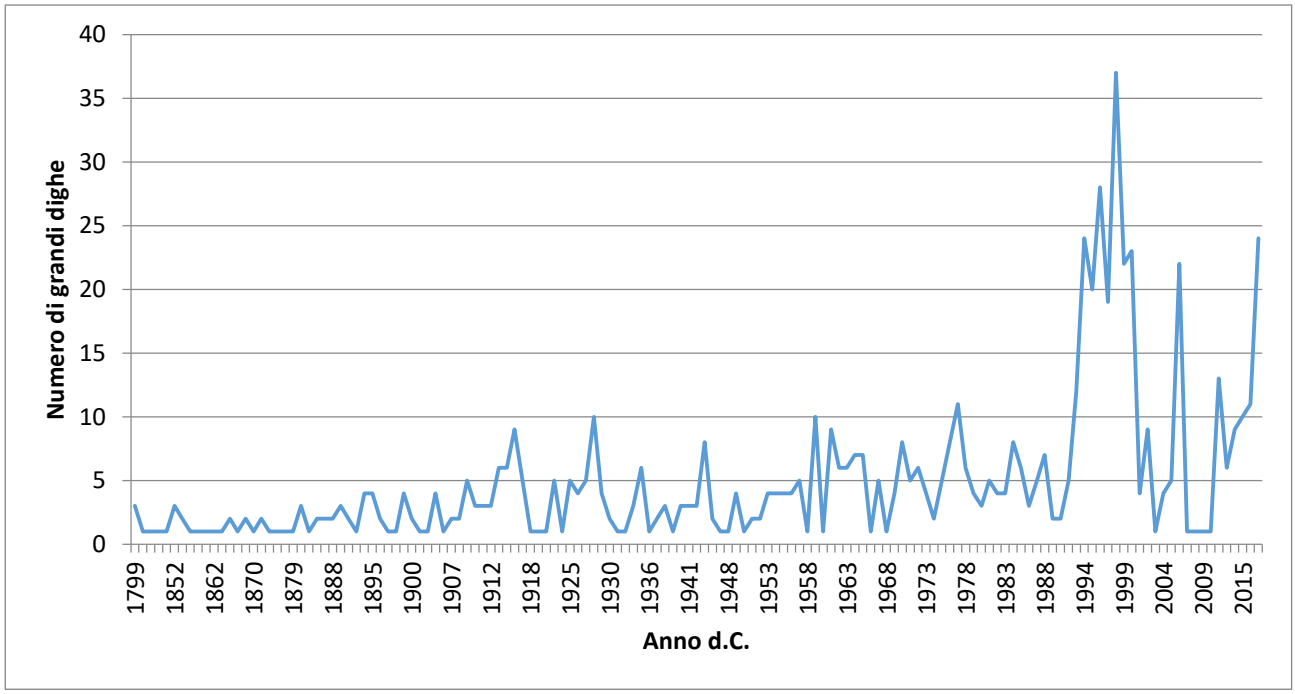


Figura 131 - Distribuzione temporale dell'anno di costruzione delle grandi dighe coinvolte da incidenti

In primo luogo, si nota subito come vi sia una sostanziale differenza nel numero di dati tra piccole e grandi dighe come anche l'andamento simile (pur se con proporzioni diverse) per l'arco temporale che va dal 1990 al 2010, sia per quanto riguarda le piccole che le grandi dighe (Figura 130 e Figura 131); non si può dedurre da questo che gli invasi costruiti in questi anni si dimostrino più sensibili a incidenti e criticità, bensì è lecito attendersi che le campagne di acquisizione delle informazioni si siano potute concentrare maggiormente sull'immediato passato, senza considerare che buona parte delle dighe ricadenti in questo intervallo hanno subito gli incidenti intercorsi negli ultimi anni, quindi con una probabilità più elevata di essere inseriti nelle banche dati, visto che si tratta di un campo di studio ancora in via di sviluppo[144]. Può stupire inoltre la regolarità dell'andamento al di fuori del periodo sopracitato, contrariamente a quanto mostrato nel database complessivo: la discriminante è da individuare nelle dighe di cui è noto l'anno di costruzione ma non l'altezza (una quota non indifferente, circa 500) e che per ragioni di coerenza non sono state inserite né nel database incidenti di piccole dighe, né in quello delle grandi.

A conclusione del presente paragrafo, si raffigura l'andamento temporale della popolazione di grandi dighe estratto dal database ICOLD, unico confronto possibile con il database dighe a causa delle limitazioni riguardanti l'anno di costruzione nei record.

[144] Zhang, Xu, Jia, «Analysis of earth dam failures: A database approach»

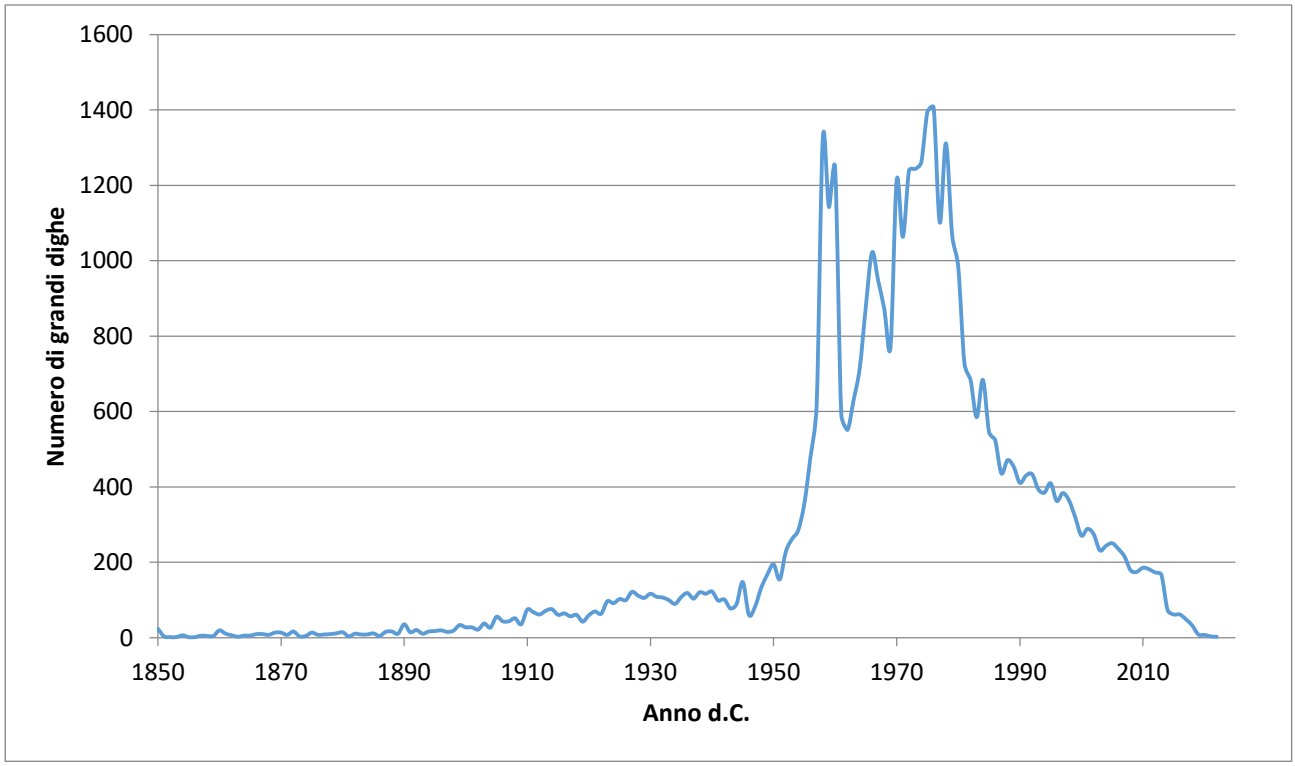


Figura 132 - Distribuzione temporale dell'anno di costruzione delle grandi dighe

Per ragioni di resa grafica, si è scelto di rappresentare unicamente le Large Dams costruite dopo il 1850, considerando tra l'altro l'esigua occorrenza di quelle più antiche in ambito di dighe e a maggior ragione di incidenti (Figura 132). La discrepanza maggiore si registra nella seconda metà del XX secolo, quando si assiste ad un'esponenziale crescita della popolazione di grandi dighe già a partire dagli anni '50, mentre a questo non corrisponde una prevedibile frequenza maggiore di incidenti. Viene quindi evidenziata ancora una volta la criticità relativa ai bias in fase di registrazione degli eventi dannosi, subordinata a ragioni di accessibilità ai dati (che risultano facilmente reperibili soltanto a partire dagli ultimi anni del secolo).

4.1.5 Distribuzione per Altezza

Appare subito evidente come la distribuzione dell'altezza delle dighe, sia per quanto riguarda gli invasi in sé che gli incidenti, sia di difficile lettura a causa della natura stessa dei record. In particolare, si sottolineano i limiti di tale analisi:

- Per quanto riguarda gli incidenti, trattandosi di un database ampio di per sé, ma che offre pochi dati rispetto a quelli richiesti per ottenere un campione totalmente esaustivo, si verificano continui picchi positivi e negativi. L'andamento medio sembra tuttavia risultare piuttosto realistico, con un'occorrenza maggiore in corrispondenza delle altezze intorno ai 5 metri e un generale aumento nella fascia 0-15 metri (che combacia con la presenza di piccole dighe in misura decisamente maggiore alle grandi, nonché alla loro predisposizione a subire incidenti)
- In materia di dighe, invece, si evidenzia in questo caso l'inevitabile scollamento tra i record ICOLD e quelli del database NPDP ricalibrato; la differenza risiede proprio nella natura simulativa di quest'ultima operazione, che induce un'inevitabile e maggiorata concentrazione di dati in corrispondenza dei valori di altezza già di per sé catalizzanti da questo punto di vista (in mancanza di informazioni certe, NPDP tende ad attribuire valori di altezza approssimati all'unità o a numeri notevoli). Se tuttavia si prende in considerazione il trend indotto dai picchi localizzati, esso sembra costituire la naturale prosecuzione dell'aumento di numerosità che si registra per le grandi dighe a ridosso dei 15 metri, a parziale conferma della bontà dell'assemblaggio, malgrado tutte le criticità finora evidenziate

Tenuto conto di questo fenomeno, si è deciso di ricorrere ad una categorizzazione delle altezze per fasce, come già fatto per l'analisi dei singoli database. In questo caso, vale comunque la pena rivedere la suddivisione alla luce di un range di altezze molto più ampio, mantenendo comunque i ragionamenti esplicitati sia per le piccole che per le grandi dighe per ragioni di coerenza interna. Dopo una revisione dei due insieme di sottoclassi indipendenti, si è pervenuti alla seguente tabella (Tabella 41):

	Altezza MIN [m]	Altezza MAX [m]
Classe 1	0	5
Classe 2	5	10
Classe 3	10	15
Classe 4	15	25
Classe 5	25	35
Classe 6	35	50
Classe 7	50	75
Classe 8	75	100
Classe 9	100	200
Classe 10	200	400

Tabella 41 - Suddivisione in classi di Altezza

A livello pratico, si è deciso di passare da una suddivisione ogni 2,5 metri a una ogni 5 metri per le piccole dighe, mentre per le grandi si è mantenuto all'incirca il rapporto crescente di range di altezza, riducendo leggermente il dettaglio dello stesso. Riproponendo la distribuzione in altezza,

sia per le dighe che per i relativi incidenti, filtrata attraverso queste classi, si ottiene (Tabella 42 e Tabella 43):

	Numero di dighe
Classe 1	15783
Classe 2	45590
Classe 3	84453
Classe 4	26051
Classe 5	9705
Classe 6	5503
Classe 7	3120
Classe 8	1069
Classe 9	887
Classe 10	65

Tabella 42 - Numero di dighe per Altezza

	Numero di dighe
Classe 1	497
Classe 2	843
Classe 3	374
Classe 4	361
Classe 5	136
Classe 6	93
Classe 7	65
Classe 8	24
Classe 9	18
Classe 10	3

Tabella 43 - Numero di dighe coinvolte da incidenti per classi di Altezza

E' immediatamente possibile calcolare la frequenza relativa degli incidenti per ogni classe, che nello specifico risulta (Tabella 44):

	Frequenza relativa incidenti
Classe 1	3.15%
Classe 2	1.85%
Classe 3	0.44%
Classe 4	1.39%
Classe 5	1.40%
Classe 6	1.69%
Classe 7	2.08%
Classe 8	2.25%
Classe 9	2.03%
Classe 10	4.62%

Tabella 44 - Frequenza relativa degli incidenti per Classi di Altezza

Naturalmente, va sempre specificato che si potrebbero incontrare deviazioni statistiche relative soprattutto al numeratore del rapporto appena calcolato per ogni classe, che più di ogni altro parametro è connesso alla qualità della ricerca di incidenti a monte del presente studio. Al netto di ciò, si registra comunque un trend piuttosto netto con un minimo in corrispondenza della Classe 3 (10-15 metri) a cui si arriva dopo il picco iniziale per le dighe più basse (Classe 1) e a seguire del quale la tendenza è quella dell'aumento progressivo dell'occorrenza fino al massimo complessivo del 4,62% per la Classe 10. Questo fenomeno si può spiegare considerando che le dighe a ridosso dei 15 metri sono quelle a cui normalmente viene dedicata una cura maggiore perché rimangono le più efficienti pur restando al di sotto della soglia dei 15 metri che vedrebbe il passaggio alla definizione di "Large Dam", a cui corrisponde spesso una riduzione degli incentivi statali. Inoltre, la percentuale elevata di presunti incidenti per le dighe di altezza inferiore ai 5 metri è da interpretare piuttosto alla luce della scarsità di record in questa fascia, mentre la crescita per le grandi dighe rimane sintomo delle difficoltà ingegneristiche crescenti che si incontrano parallelamente all'aumentare dell'altezza. In particolar modo, non appena si superano i 200 metri, la percentuale tende addirittura a raddoppiare, mentre tre i 50 e i 100 metri si mantiene pressoché costante (qui si evidenzia il gap tecnologico imposto dalle dighe più imponenti). Diventa interessante anche eseguire un confronto a livello grafico:

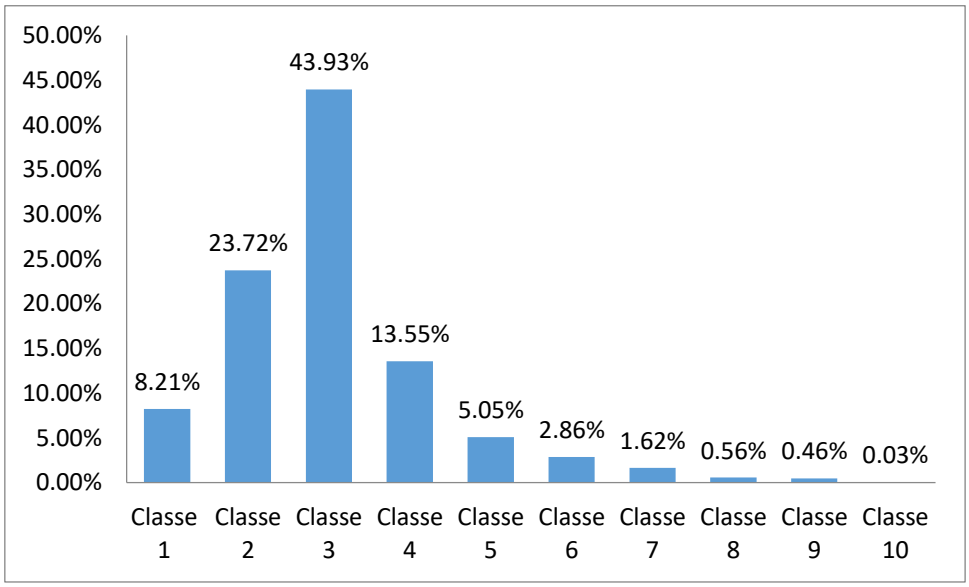


Figura 133 - Distribuzione in Altezza per la popolazione complessiva di dighe

La suddivisione percentuale per Altezza identifica in maniera immediata il picco in Classe 3, che si staglia nettamente vista la distanza notevole con le Classi adiacenti (Figura 133): questo perché mantenersi al di sotto dei 15 metri consente di ricadere nell'ambito delle piccole dighe, che da un lato limita la complessità del progetto, dall'altro permette di accedere, soprattutto nel settore idroelettrico, ad agevolazioni fiscali e finanziamenti a livello statale[145]. Ovviamente, al tempo stesso si tende a massimizzare la capacità di invaso posizionandosi a ridosso del limite dei 15 metri. La maggiore numerosità delle Small Dams continua ad emergere anche attraverso la quota elevata

[145] Yazdanian, Ghasemi, Fahim et al. «EFFECT OF HEIGHT ON THE STATIC STABILITY OF HETEROGENEOUS EMBANKMENT DAMS»

della Classe 2 e soprattutto della Classe più bassa, che malgrado un'altezza seriamente contenuta, si colloca appena dietro la Classe 4 (15-25 metri). Infine, si nota come a partire dalla Classe 6 le differenze di numerosità appaiono minime, segno che da una certa altezza in poi (nello specifico, i 50 metri) la scelta di realizzare un dato invaso tende a dipendere sempre meno dallo sviluppo verticale, che impone soluzioni tecniche quasi egualmente avanzate, quanto piuttosto dalle esigenze funzionali[146].

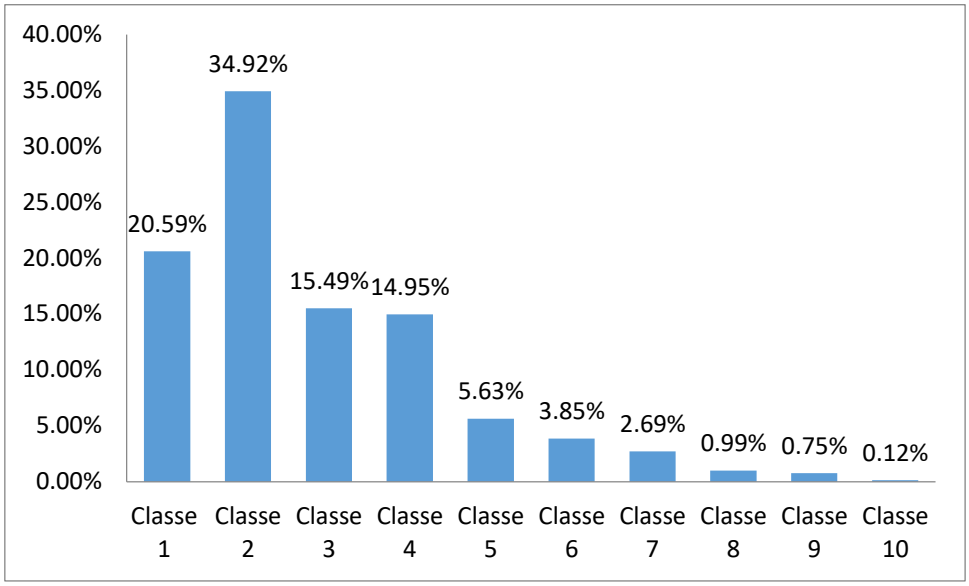


Figura 134 - Distribuzione in Altezza per il database incidenti

La raffigurazione dell'identica suddivisone, ma applicata agli incidenti rivela una situazione relativamente diversa (Figura 134): il massimo assoluto rimane l'unico punto di picco e non sono previsti minimi relativi, ma pur ricadendo ancora nella fascia delle piccole dighe risulta traslato sensibilmente verso la Classe 2. Questa traslazione è ribadita dal fatto che la seconda Classe per occorrenza relativa diventa addirittura quella caratterizzata da un'altezza inferiore ai 5 metri; al contrario, subito dopo il picco si assiste ad un crollo nell'intensità percentuale dal 34 al 15%, percentuale che si conserva pressoché immutata anche in Classe 4: la sensibilità agli incidenti sembra non dipendere dal passaggio tra le piccole e le grandi dighe. Infine, la distribuzione per le ultime Classi non presenta variazioni degne di note, in quanto segue un lento decremento tra la Classe 5 e la Classe 7, per poi collocarsi al di sotto del punto percentuale per le ultime tre.

4.1.6 Distribuzione per Anno Incidente

L'anno di incidente rappresenta la prima variabile in analisi che risiede internamente al database incidenti e che quindi, per ovvi motivi, non può essere messa in relazione con la popolazione mondiale di dighe. Essa rappresenta tuttavia un'informazione cruciale perché consente di fotografare l'andamento temporale degli incidenti e stimare il rapporto tra il progresso tecnologico e la frequenza degli incidenti, in maniera relativamente simile a quanto già verificato attraverso lo studio dell'anno di costruzione. La differenza sostanziale tra i due approcci riguarda principalmente la natura dei dati: nel caso dell'anno di costruzione, può interessare il periodo storico di riferimento

[146] Asian Development Bank, «Dam Optimization»

per le tecniche costruttive impiegata in fase progettuale; se si considera l'anno di incidente, ciò che interessa riguarda più da vicino temi come la manutenzione e la supervisione degli impianti. Inoltre, è possibile mettere in relazione diretta alcuni eventi storico-economici con picchi positivi o negativi nella frequenza di incidenti, come ad esempio guerre oppure particolari scoperte in ambito di sicurezza che possono condurre ad una sensibile riduzione degli incidenti a partire dalla data di riferimento. Fatta tale premessa, conviene passare alla trattazione specifica del numero di incidenti per anno, suddivisi come di consueto tra database complessivo, piccole e grandi dighe.

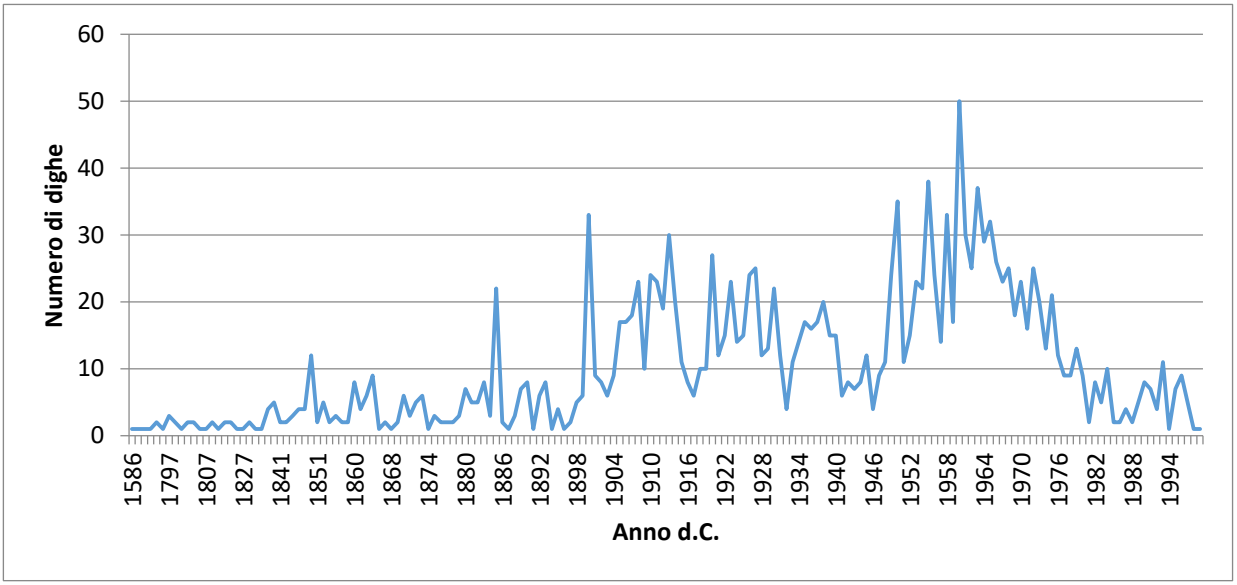


Figura 135 - Distribuzione temporale dell'Anno di Incidente per le dighe coinvolte da incidenti

Come prevedibile, fino a metà del 1800 il numero di incidenti per anno si mantiene molto al di sotto delle dieci unità: da un lato, fino alla Rivoluzione Industriale, il numero di dighe a livello mondiale rimane decisamente contenuto e si tratta perlopiù di piccoli invasi in terra che, malgrado il livello di sicurezza piuttosto basso, possono conservarsi incolumi per lunghi periodi (Figura 135). A questa considerazione si aggiunge l'inevitabile penuria di informazioni sulle dighe che caratterizza periodi storici di gran lunga precedente allo sviluppo di una Scienza Ingegneristica evoluta e capace di lasciare traccia dei propri progressi. Il primo picco si registra appunto intorno alle metà del XIX secolo, quando nei Paesi Europei più avanzati e negli USA si assiste alle prime criticità diffuse relative agli invasi che si è iniziato a costruire a partire dai primi anni del secolo; ad esso segue un periodo in cui i picchi di frequenza risultano significativamente inferiori, sintomo della prima presa d'atto della possibilità di incidenti per gli invasi, con conseguente introduzione di rudimentali misure di salvaguardia, che si dimostrano sufficienti perlomeno a contenere i fenomeni distruttivi fino agli anni '80 del medesimo secolo, in corrispondenza dei quali si inserisce un picco di altezza pressoché doppia rispetto al massimo precedente, e cosa ancora più singolare circondato da una serie di anni con un numero di incidenti decisamente più contenuto. Una tale concentrazione può naturalmente essere spiegata con una normale deviazione statistica oppure la tendenza a concentrare incidenti dalla data incerta nello stesso anno; tuttavia, trattandosi di un periodo storico tendenzialmente documentato (talvolta perfino con l'ausilio della fotografia), la seconda ipotesi appare piuttosto irrealistica. Più probabile un nuovo aumento di altezza e capacità di invaso delle dighe, a cui consegue l'incremento dell'asticella della sicurezza che porta ad un momentaneo periodo di generale insicurezza degli impianti. Il picco molto pronunciato successivo è situato

precisamente sull'anno 1900, e in questo caso non è difficile immaginare che si tratti della condensazione di più record distinti al primo anno del secolo. Al netto di questa singolarità, fino al 1914 il numero di incidenti per anno si conserva intorno alle 20/30 unità, fatte salve le oscillazioni fisiologiche; a seguire, il primo evento storico di cui si può trovare traccia è la Grande Guerra, che vede un crollo improvviso del numero di incidenti, un dato che potrebbe sembrare a prima vista in controtendenza con lo stato belligerante, tra l'altro diffuso per la prima volta a livello continentale Europeo e in parte mondiale. Tale fenomeno va spiegato in primo luogo con la difficoltà di avere certezze sulle criticità intercorse in un lasso di tempo in cui l'interesse principale dell'Ingegneria riguardava certamente ambiti molto distanti dall'Idraulica (Scienza Militare in primis), nonché con l'impossibilità, spesso, di distinguere tra gli incidenti avvenuti per cause naturali rispetto a quelli indotti da bombardamenti o in generale per ragioni belliche. A seguire si assiste ad un leggero ma costante declino del numero di incidenti, probabilmente dovuto al fatto che i progressi tecnologici conseguiti a margine del conflitto hanno avuto delle ricadute anche in ambito strutturale; curiosamente, l'unico dato realmente discordante si situa subito dopo il 1929, l'anno di inizio della Grande Depressione, un periodo storico che vede un calo generalizzato della produzione industriale e con esso delle opera di interesse nazionale, non soltanto negli Stati Uniti. A seguire, non è difficile immaginare che il secondo conflitto mondiale, combattuto su scala perfino più ampia, imponga una drastica riduzione dei record annuali, per ragioni analoghe a quelle descritte in precedenza; inoltre, vale la pena sottolineare come, contrariamente a quanto avvenuto negli anni Venti, subito dopo la fine della Seconda Guerra Mondiale si verifichi un'impennata improvvisa della frequenza di incidenti, che culmina con la ragguardevole quota di 50 incidenti all'anno intorno al 1960. Si tratta sicuramente di un fenomeno parallelo alla diffusa campagna di costruzione delle dighe che accompagna la ricostruzione post-bellica, che impone un aumento del numero di incidenti fino a quando il boom economico degli Anni Sessanta restituisce nozioni di sicurezza più accurate e strumenti di monitoraggio maggiormente efficienti. Da questo momento in poi il calo del numero di incidenti inizia inesorabilmente con un trend piuttosto regolare e pronunciato verso il basso, per stabilizzarsi intorno agli Anni Ottanta, quando si raggiunge uno stato dell'Arte in fatto di sicurezza difficilmente potenziabile se non in misura molto contenuta, oltre ovviamente al calo di edificazione di nuovi invasi. A partire da questo decennio, la frequenza annua si aggira in media intorno alle cinque unità[147].

[147] https://tataandhoward.com/2016/05/a-history-of-dams-from-ancient-times-to-today/

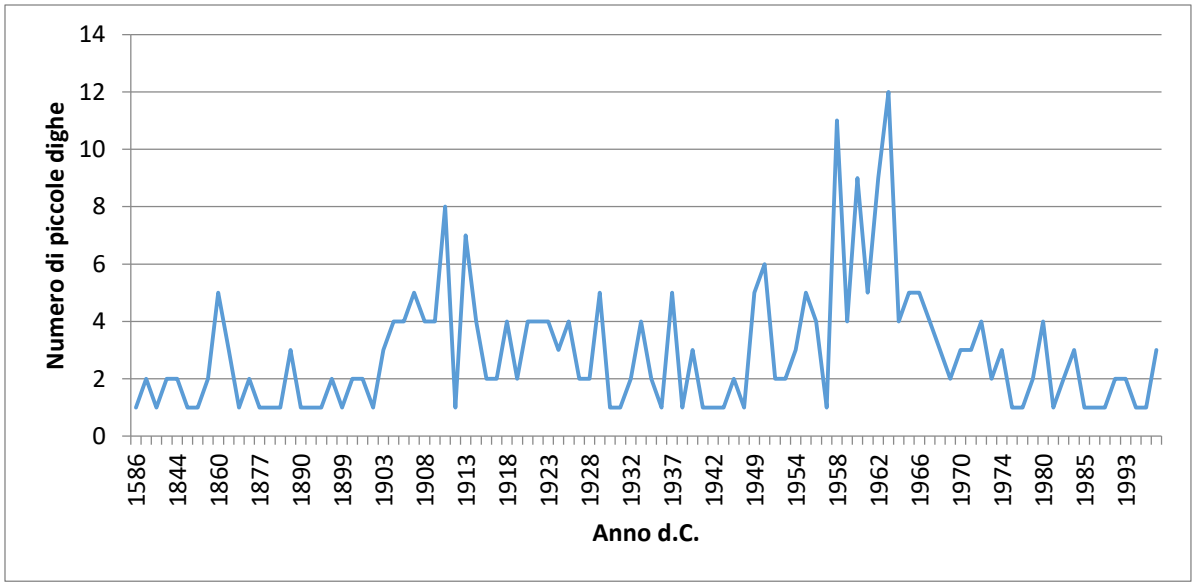


Figura 136 - Distribuzione temporale dell'Anno di Incidente per le piccole dighe coinvolte da incidenti

Passando alla visualizzazione limitata alle piccole dighe (che si ricorda rappresentare circa un sesto del database totale, quindi un campione sicuramente meno significativo), al di là dell'analisi dettagliata, risulta più significativa la comparazione con il trend del database nella sua totalità (Figura 136). Anche in questo caso, si assiste ad un aumento improvviso verso la metà del XIX secolo, mentre a seguire l'andamento appare piuttosto regolare, anche in corrispondenza degli eventi evidenziati (come le due Guerre e la crisi economica). Va considerato che l'interesse per le piccole dighe è sempre stato più limitato; ma soprattutto, per propria natura, le piccole dighe non possono superare i 15 metri e di conseguenza la richiesta tecnologica per costruirle tende ad un asintoto per quanto riguarda l'altezza. In altre parole, anche con il progresso tecnologico, le piccole dighe non costituiscono una sfida crescente, se non al massimo per quanto riguarda l'ampiezza del bacino. Per quest'ultimo motivo, esse non sono immuni da periodi di particolare frequenza degli incidenti, uno su tutti il Secondo Dopoguerra, in cui tra l'altro si assiste per la prima volta anche in Europa ad un impiego diffuso del cemento armato per gli invasi minori, i quali tendono a dare problemi di durabilità già a partire dagli anni Sessanta (la conoscenza approfondita a proposito del degrado del CLS rimane piuttosto recente)[148]. Anche il crollo successivo a questo periodo è da interpretarsi con la relativa facilità di intervenire a livello di sicurezza sulle piccole dighe, con conseguente arrestarsi improvviso del numero annuale di incidenti; addirittura, la stabilizzazione dell'occorrenza di incidenti, che in precedenza richiedeva di attendere il 1980, in questo caso si verifica già prima degli Anni Settanta, con una frequenza annua intorno ai due o tre record (ovviamente in proporzione alla popolazione di incidenti decisamente inferiore rispetto ai bacini maggiori).

[148] Van Damme, «Concrete material science: Past, present, and future innovations»

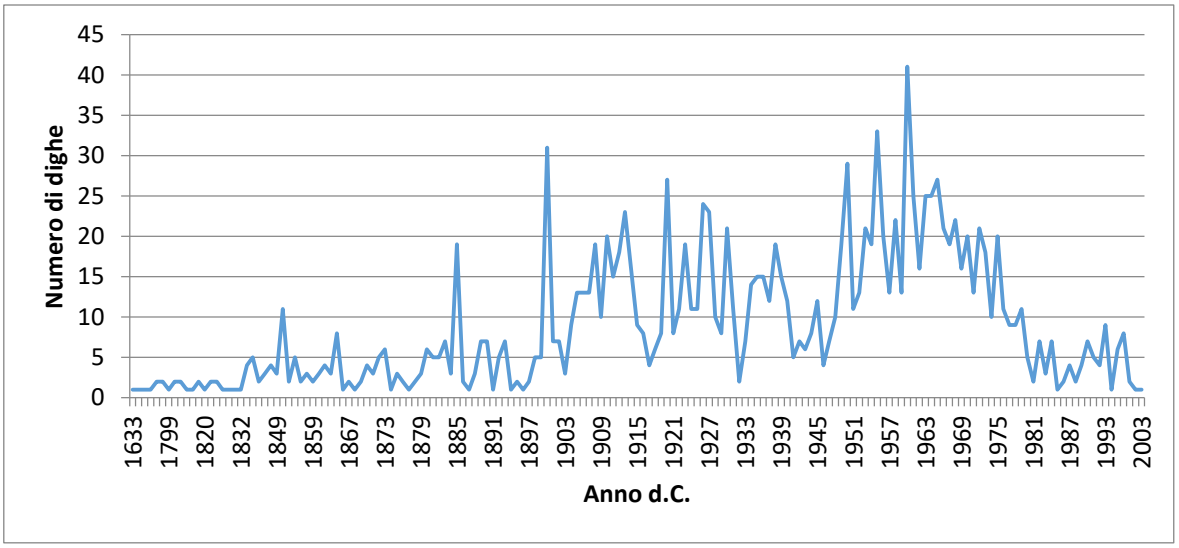


Figura 137 - Distribuzione temporale per Anno di Incidente delle grandi dighe coinvolte da incidenti

Vista la forte preponderanza di casi di incidente per le grandi dighe (circa 5 record su 6, tra quelli di altezza nota, ricadono in questa categoria), è lecito attendersi che in media il trend segua quello già studiato all'inizio del paragrafo (Figura 137). Ciò tuttavia non è del tutto vero a causa dell'esistenza di un numero non trascurabile di incidenti associati ad invasi di altezza non registrata, che, sebbene presenti nel database complessivo, non possono ovviamente essere inseriti né nella trattazione delle piccole dighe, né in quella delle grandi. I picchi positivi e negativi sembrano in ogni caso corrispondere a quelli delle dighe nella loro totalità, ad esempio: alla metà del XIX secolo e poco prima della fine del medesimo secolo, in corrispondenza dell'anno 1900 e intorno agli Anni Sessanta (per i massimi), mentre i periodi contraddistinti da cali repentini sono da ricercare nella Grande Depressione e nelle Due Guerre Mondiali. I punti di riferimento sembrano quindi rimanere inalterati, ma a variare è il trend che li collega: in particolare, si evidenzia che la diminuzione degli incidenti post-1960 è decisamente maggiore, sintomo di forti investimenti negli anni del boom economico per migliorare la sicurezza degli invasi di maggiori dimensioni[149].

[149] Billington, Jackson, Melosi, «The history of Large Federal Dams: Planning, Design and Construction »

4.1.7 Distribuzione per Database di Origine

Database di Origine	Numero di dighe
NPDP	3120
Jandora e Riha	120
Database ARIA	117
ICOLD	115
Enviroment Agency UK	92
Unknown	22
British Dam Society	22
Thandaveswara	20
damfailures.org	18
Dam Safety Office	9
Alhasan	4
Missouri Institute	2
Italy Database	2

Tabella 45 - Numero di dighe coinvolte da incidenti per Database di Origine

La distribuzione dell'origine dei record inclusi nel database evidenzia fin da subito una delle criticità più insormontabili: estendere l'analisi degli incidenti al di fuori del database NPDP, che da solo arriva a raccogliere più dell'80% dei casi totali. Si tratta in ogni caso di incidenti diffusamente documentati e da cui non si può prescindere, pur accettando un bias naturale nei dati a causa di questa netta preponderanza (Tabella 45). Al di fuori di NPDP, le fonti successive si dimostrano piuttosto regolari, tutte capaci di fornire un centinaio di incidenti in media: nello specifico, siamo di fronte allo studio di Jandora e Riha, al Database ARIA, a quello ICOLD proveniente dal Bulletin 99 e alla banca dati dell'Environment Agency UK. Se si considera che nelle prime cinque posizioni si installano ben quattro database, risulta immediato considerare questa tipologia di fonte come privilegiata rispetto a quelle testuali, sebbene quest'ultime possano contare su un grado di dettaglio decisamente maggiore e abbiano la capacità di associare ai semplici dati anche descrizioni e correlazioni[150]. Nella parte intermedia della classifica troviamo invece una serie di pubblicazioni scientifiche che concorrono a portare circa 20 casi ciascuna, con una forte connotazione territoriale. Chiudono la classifica alcuni approfondimenti molto limitati dal punto di vista dei record, ma significativi in quanto corredati da schede di approfondimento di ogni caso studio (ad esempio sugli incidenti Italiani oppure da parte del Dam Safety Office degli USA).

[150] Zhang, Xu, Jia, «Analysis of earth dam failures: A database approach»

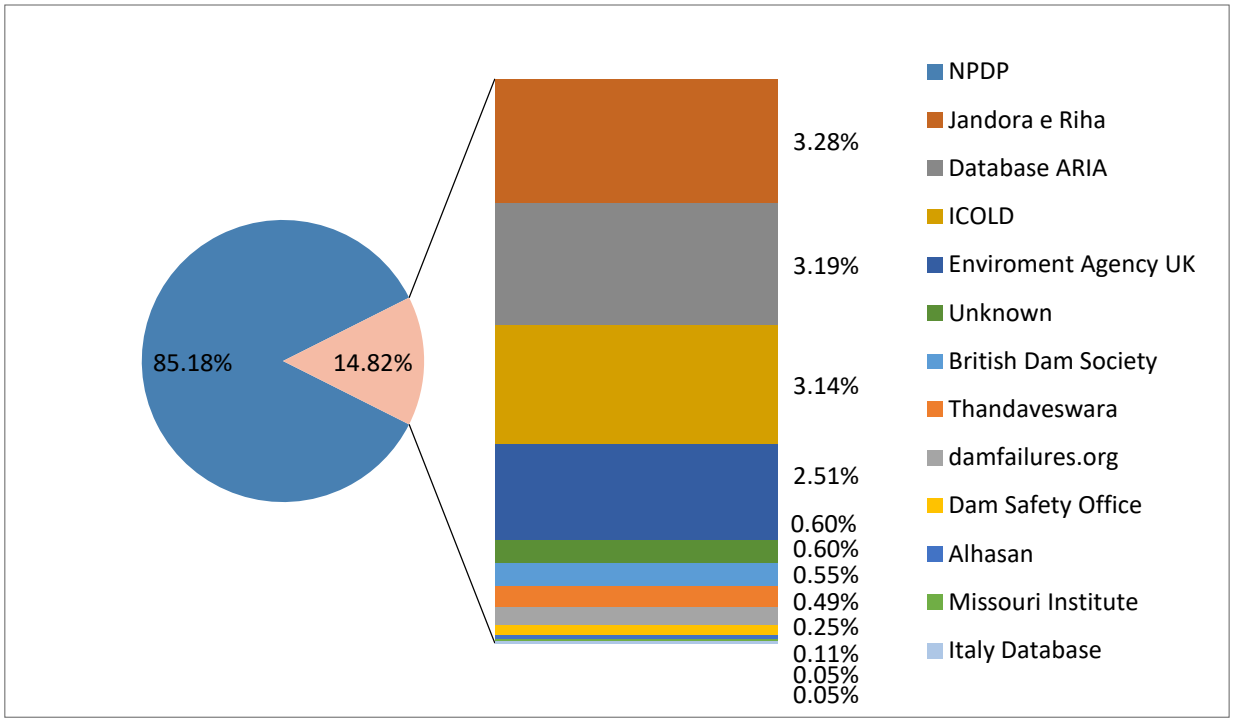


Figura 138 - Suddivisione percentuale delle dighe coinvolte da incidenti per Database di Origine

Se si analizza la stessa distribuzione dal punto di vista dei rapporti percentuali (Figura 138), appare ancora più evidente come la preponderanza NPDP sia talmente elevata da indurre inevitabili bias legati alle scelte compiute dal suddetto ente nella registrazione degli incidenti (ad esempio, il fatto che si concentri pressoché esclusivamente sugli incidenti nordamericani e più specificatamente statunitensi). Sebbene a prima vista si tratti di una forte limitazione, la notevole estensione territoriale degli USA e la loro natura federale contribuiscono a rendere l'analisi sufficientemente rappresentativa per tutti gli aspetti non direttamente connessi a parametri geografici. Soltanto 15 incidenti ogni 100 provengono da altre fonti, e di questi ben 13 fanno riferimento ai database "nazionali" di Francia e Regno Unito (rispettivamente ARIA e Environment Agency UK), al Bollettino ICOLD numero 99 (di caratura internazionale, pur se sempre con un focus privilegiato sugli USA. La restante quota del 2% è suddivisa su 8 diversi database, tendenzialmente di natura testuale e spesso estrapolati non da banche dati, bensì da schede di approfondimento.

Database di Origine	Numero di piccole dighe
NPDP	346
Enviroment Agency UK	23
Jandora e Riha	11
British Dam Society	5
damfailures.org	5
Dam Safety Office	3
Thandaveswara	2
ICOLD	2

Tabella 46 - Numero di piccole dighe coinvolte da incidenti per Database di Origine

Se l'analisi viene riferita unicamente alle piccole dighe, si scopre subito come alcuni database non compaiono (Tabella 46): si tratta di un fenomeno che coinvolge in misura maggiore le pubblicazioni scientifiche che tendono a concentrarsi più frequentemente sui casi di incidente più eclatanti, in

massima parte appartenenti all'ambito delle grandi dighe. Il gap più elevato si registra in corrispondenza del database ICOLD, che su 115 record ne decida soltanto un paio agli invasi al di sotto dei 15 metri di altezza, segno ancora una volta di come queste ultime facciano fatica ad essere rappresentate. Le altre fonti sembrano invece essere più in linea con le proporzioni del database complessivo, come si evince dal seguente grafico:

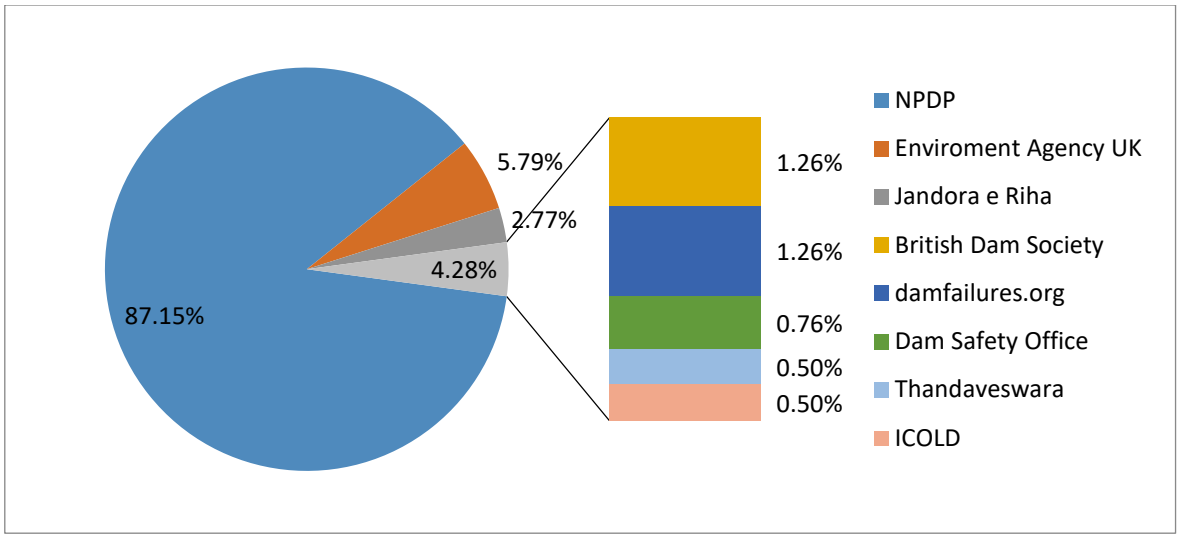


Figura 139 - Suddivisione percentuale di piccole dighe coinvolte da incidenti per Database di origine

La quota NPDP, seppur leggermente aumentata, rimane nella fascia 80/90% (Figura 139). Per Environment Agency avviene un aumento di quasi il 50%, cosa che sottolinea come l'interesse ambientale nel Regno Unito sia giustamente indirizzato in modo più pronunciato agli invasi minori, che possono causare notevole impatto sul territorio; un trend confermato dalla British Dam Society, che arriva quasi a triplicare la frazione relativa di record. Al contrario, Jandora e Riha, che ricordiamo essere due scienziati, si concentrano come già ribadito più volte in precedenza sulle grandi dighe, che consentono approfondimenti di documentazione sicuramente maggiori rispetto alle piccole; di conseguenza, la loro occorrenza relativa diminuisce leggermente.

Database di Origine	**Numero di grandi dighe**
NPDP	2774
Database ARIA	117
ICOLD	113
Jandora e Riha	109
Enviroment Agency UK	69
Unknown	22
Thandaveswara	18
British Dam Society	17
damfailures.org	13
Dam Safety Office	6
Alhasan	4
Missouri Institute	2
Italy Database	2

Tabella 47 - Numero di grandi dighe coinvolte da incidenti per Database di Origine

Se invece si passa allo studio delle grandi dighe, tutte le fonti di informazioni risultano rappresentante, a dimostrazione dell'interesse generalizzato per i grandi invasi (Tabella 46 e Tabella 47). Come di consueto, NPDP costituisce il protagonista indiscusso del database e l'ordine complessivo rimane pressoché immutato, ad eccezione di Jandora e Riha che perdono qualche posizione a favore di ARIA e ICOLD, tradizionalmente legati allo studio dei bacini di dimensioni più imponenti. Anche Environment Agency UK appare abbastanza ridimensionato, in quanto al suo interno resiste una componente non trascurabile di piccole dighe a causa dei naturali problemi di impatto ambientale che anche i bacini minori presentano.

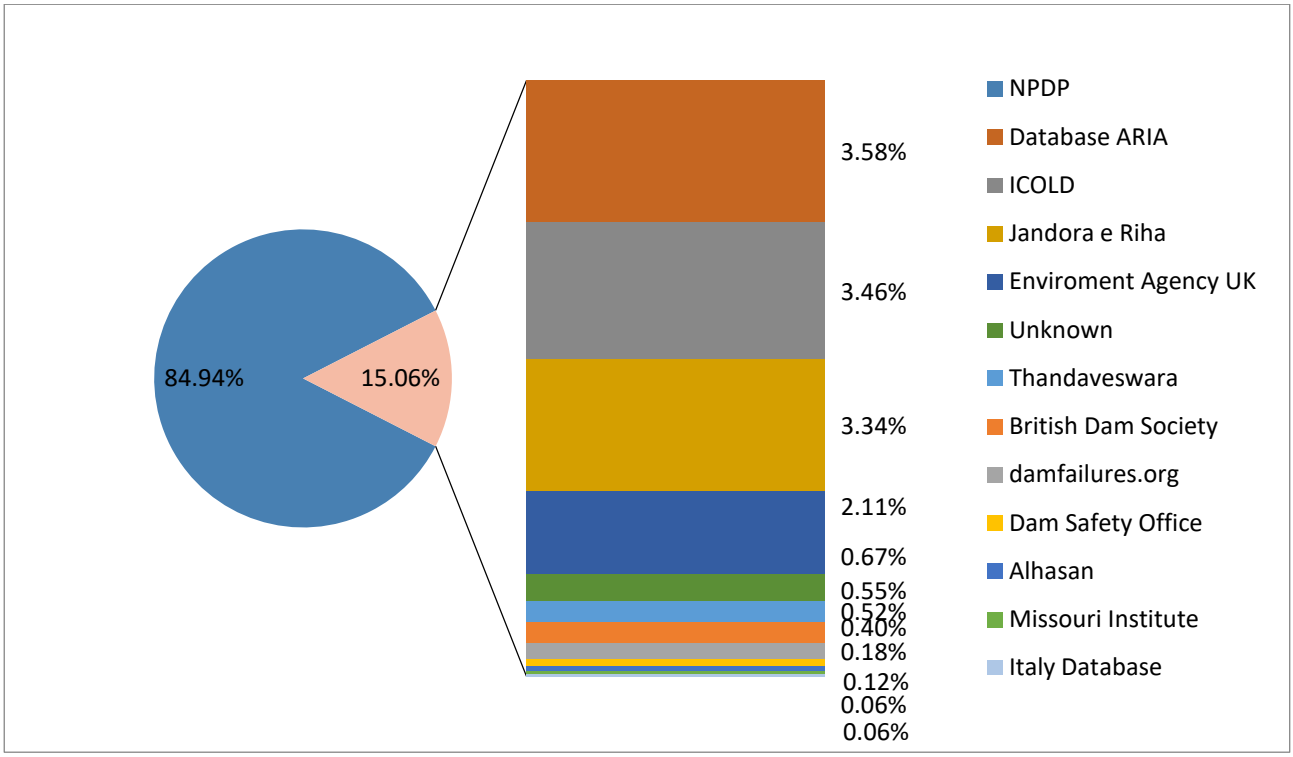


Figura 140 - Suddivisione percentuale delle grandi dighe coinvolte da incidenti per Database di Origine

Raffigurando le proporzioni relative, emerge una quasi impercettibile riduzione relativa dell'occorrenza di NPDP, mentre il restante 15% non offre particolari novità, in quanti siamo di nuovo di fronte ad una serie di fonti che coprono ciascuna circa il 3% e le restanti relegate in fondo con percentuali non superiori a 0,6% (Figura 140).

4.1.8 Distribuzione per Causa

Etichette di riga	Numero di dighe
Overtopping	895
Quality problems	728
Structural problems	197
Others	158
Earthquake	158
Unknown	135
Poor management	125
Disasters	18

Tabella 48 - Numero di dighe coinvolta da incidenti per Causa

La suddivisione più ampia delle tipologie di incidente vede coinvolte 8 categorie, di cui le prime due spiccano notevolmente per la loro numerosità (Tabella 48): si tratta dell'Overtopping, che rispetta le aspettative di causa maggiore di crollo per le dighe di ogni tipo (e in particolar modo in terra) e dei Quality Problems, una denominazione piuttosto generica che raccoglie al suo interno principalmente i problemi di Piping e le criticità di condotte e sfioratore. Il numero di incidenti supera per entrambi i 700 record e sfiora i 900 per l'Overtopping. A seguire troviamo cinque categorie che si installano tra i 100 e i 200 casi, quindi appare evidente come al di fuori delle due tipologie più diffuse, la distribuzione sia notevolmente omogenea[151]. Entrando nel dettaglio, si hanno poco meno di 200 incidenti causati da Structural Problems (dovuti a degrado del materiale oppure a errori di design), che precedono di poco gli incidenti di vario tipo, che coprono una gamma molto ampia: influenza della vegetazione, interazione con animali selvatici, cicli di gelo-disgelo, ecc… Si è scelto di non approfondire l'analisi in questo senso perché le varie sottocategorie appaiono descritte in maniera superficiale e difficilmente correlabili con le altre caratteristiche degli invasi. Il numero di incidenti "Others" è identico a quello delle dighe coinvolte da terremoti, un altro fenomeno che diventa di anno in anno più studiato, grazie agli sviluppi in ambito di Ingegneria Sismica. Bisogna inoltre sottolineare che 135 incidenti risultano non classificati nemmeno dal punto di vista della tipologia: si tratta, da ricerca più dettagliata, tendenzialmente di casi poco documentati anche dal punto di vista degli altri parametri, magari perché dall'importanza secondaria oppure posizionati molto indietro nel tempo. Notevole la numerosità relativa all'Earthquake: 158 casi unici che fotografano con cura l'interesse crescente per la relazione tra dighe e sismi. Fanalino di coda la categoria Disasters che riguarda i casi limite, come la rottura catastrofica di dighe a monte dell'invaso oppure gli attentati terroristici (che risultano scarsamente documentati per ragioni di segretezza).

[151] Bureau of Reclamation, «Identifying, Describing, and Classifying Potential Failure Modes»

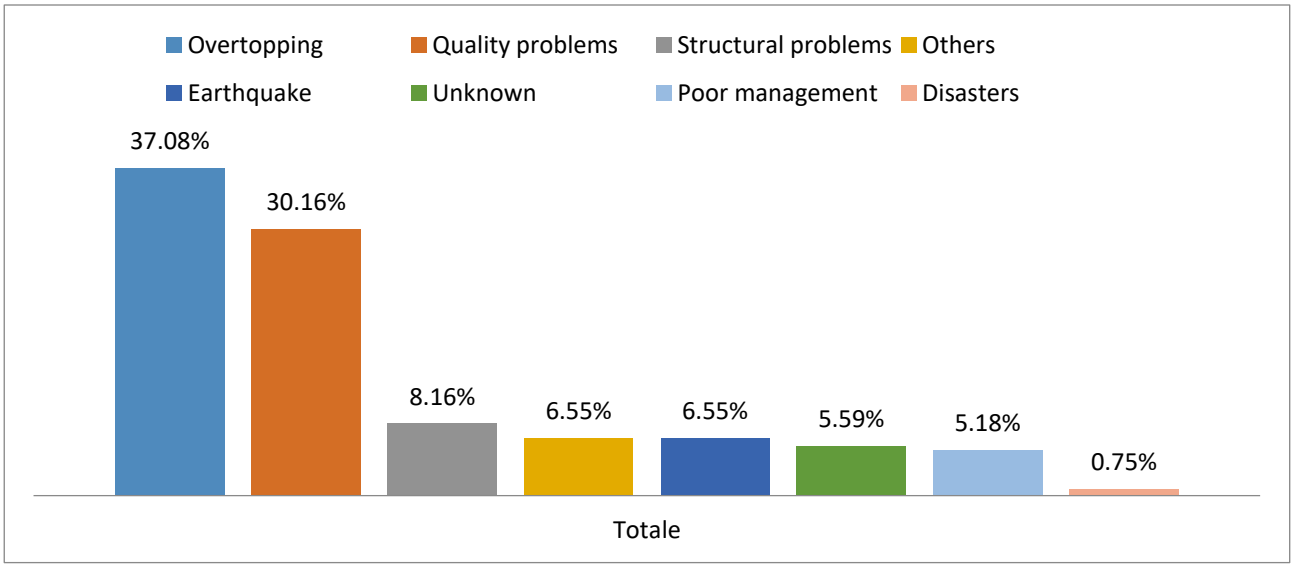


Figura 141 - Suddivisione percentuale delle dighe coinvolte da incidenti per Causa

La rappresentazione percentuale, pur non aggiungendo di per sé nuove informazioni, aiuta a identificare a colpo d'occhio le problematiche più diffuse a livello di dighe (Figura 141): in particolar modo, si evidenzia come l'Overtopping e la combinazione di Piping+Sliding (Quality Problems) siano largamente i più diffusi, arrivando da solo a coprire circa i due terzi del database. Ciò non deve stupire in quanto si tratta di criticità che interessano frequentemente le dighe in terra (massimamente presenti nella banca dati) ma che non sono assolutamente trascurabili nemmeno per le altre tipologie strutturali[152]. Si realizza poi che, al di fuori delle prime due posizioni, la distribuzione si presenta piuttosto omogenea, con un serie di tipologie di incidente tutte collocate tra il 5 e l'8%: segno che, se si escludono i problemi maggiori (ovvero quelli legati all'erosione, agli smottamenti e alle piene), non è possibile individuare una terza causa prevalente, anche se i problemi strutturali, spesso legati al progetto originale, sembrano mantenere una certa prevalenza.

Causa Generica	Numero di piccole dighe
Overtopping	135
Quality Problems	126
Structural problems	37
Earthquake	34
Others	28
Poor management	19
Unknown	17
Disasters	1

Tabella 49 - Numero di piccole dighe coinvolte da incidenti per Causa

[152] Marche, «Embankment dam overtopping and collapse: an innovative approach to predict the breach outflow hydrograph»

Se ci si concentra sulle piccole dighe (Tabella 49), il risultato è un aumento notevole delle dighe coinvolte da Overtopping, che tende ora a superare piuttosto nettamente le problematiche di Sliding e Piping, in quanto naturalmente si parla in larga parte di dighe in terra che per loro natura risultano particolarmente soggette a overtopping e, più in generale, alle criticità connesse ad ampi deflussi di acqua.

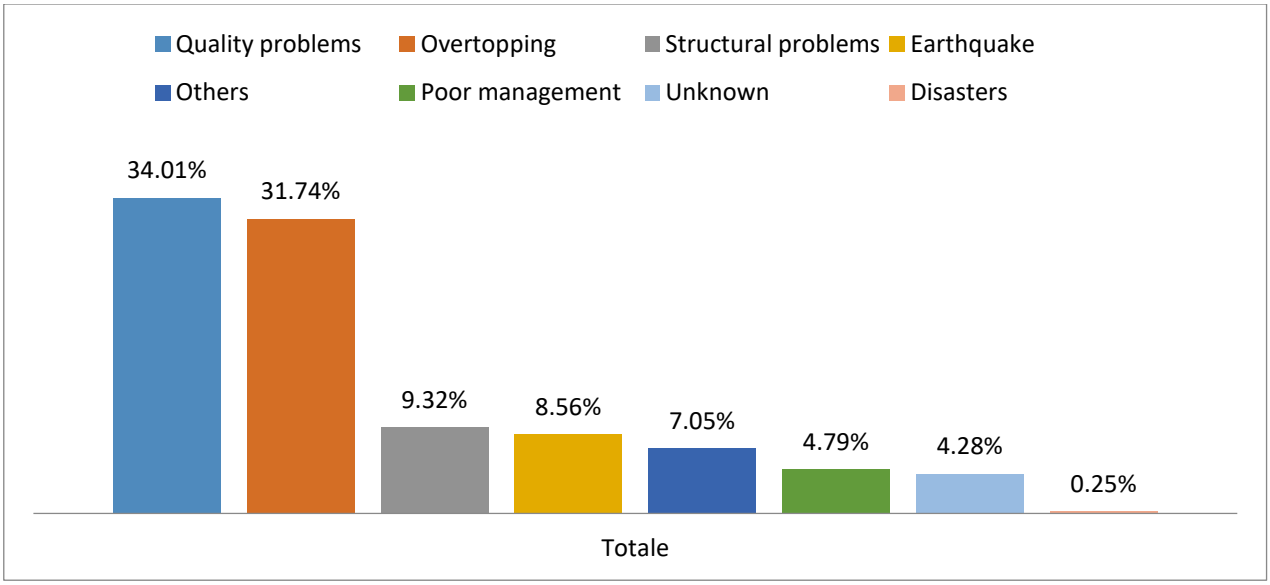


Figura 142 - Suddivione percentuale delle piccole dighe per Causa

Al di là di questo scambio di importanza, negli altri casi l'ordine rimane congelato, pur se con alcune variazioni sensibili nella numerosità relativa (Figura 142) : in particolar modo, si registra un solo caso di "Disasters", in quanto le piccole dighe risultano bersagli molto meno privilegiati dei grandi invasi in ambito terroristico.

Causa Generica	Numero di grandi dighe
Overtopping	1368
Quality problems	889
Unknown	313
Structural problems	222
Others	178
Poor management	141
Earthquake	131
Disasters	24

Tabella 50 - Numero di grandi dighe coinvolte da incidenti per Causa

Per quanto riguarda le grandi dighe, il gap relativo tra Sliding/Piping e Overtopping aumenta a favore di quest'ultimo (Tabella 50). Anche in questo caso, le prime due tipologie di incidente occupano più del 60% del database totale, lasciando un sostanziale equilibrio tra le altre categorie. Le uniche differenze sostanziali riguardano un aumento non trascurabile dell'occorrenza relativa dei "Disasters" (principalmente a causa della maggiore frequenza di attentati terroristici per gli invasi

maggiori, che costituiscono bersagli di risonanza internazionale) e da una riduzione della quota associata a "Others", che non a caso identifica tipologie di incidenti (come l'interazione con roditori o con vegetazione parassitaria) più tipiche dei piccoli bacini, in particolar modo in terra o timber[153].

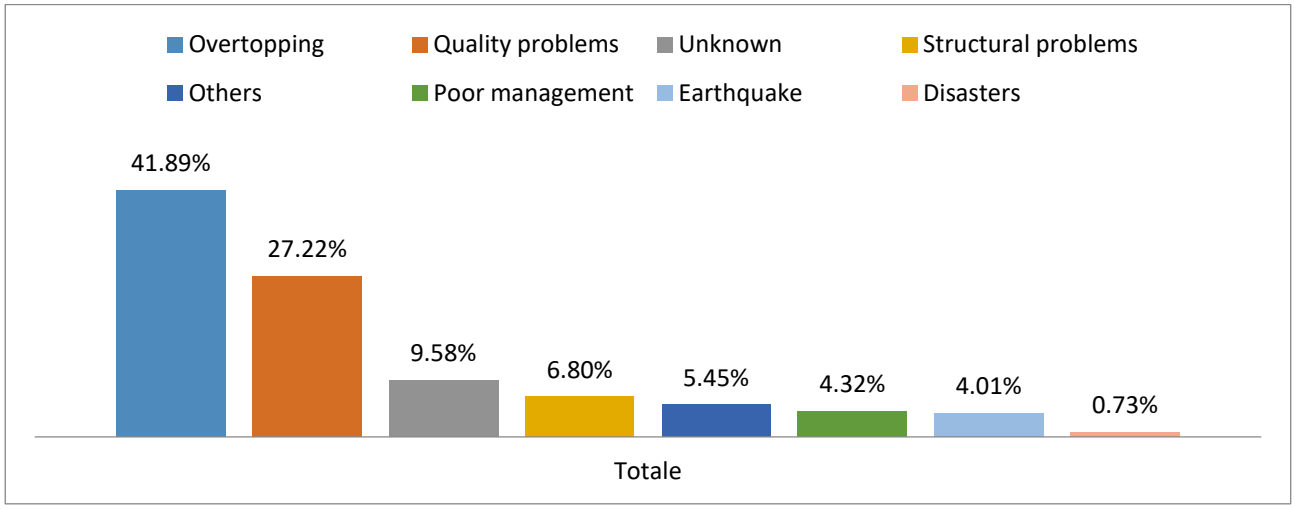


Figura 143 - Suddivisione percentuale delle grandi dighe coinvolte da incidenti per Causa

Il grafico recante le percentuali aiuta a figurarsi la differenza sostanziale rispetto alle piccole dighe, soprattutto in termine di rapporto tra lo Sliding/Piping e l'Overtopping, che sono distanziati da più 14 punti percentuali (Figura 143). Si nota anche che il Poor Management, l'Earthquake e gli Structural Problems sembrano affliggere le grandi dighe più o meno allo stesso modo (l'occorrenza di Unknown ovviamente dipende unicamente da ragioni di registrazione dei dati e non può essere correlata direttamente con le altre tipologie note).

[153] Chen, Lin, «The Total Risk Analysis of Large Dams under Flood Hazards»

4.1.9 Distribuzione per Causa Specifica

Causa specifica	Numero di dighe
Extreme flood	661
Piping in dam body	321
Piping in foundation	265
Insufficient spillway capacity	234
Earthquake	158
Unknown	135
Poor material	132
Poor maintenance and operation	125
Sliding in dam body	101
Mistakes in building	65
Vegetation	60
Animal	28
Temperature/environment action	27
Spillway blockage due to bank slide	26
Quality issues around spillway	21
Quality issues in culvert	20
Varie	17
War/Terrorist attack	9
Breaching of upstream dam	9

Tabella 51 - Numero di dighe coinvolte da incidenti per Causa Specifica

L'aumento di livello di dettaglio connesso alle cause scatenanti dei vari incidenti permette di mettere in luce la diversità intrinseca delle categorie presentate al paragrafo precedente (Tabella 51). La preponderanza dell'Overtopping che si è già manifestata viene spiegata dalla presenza delle sue due suddivisioni nelle prime quattro posizioni[154]; in particolare, l'Extreme Flood, ovvero gli incidenti generati per overtopping in seguito ad eventi metereologici oltre ai limiti di design, si mantiene nettamente in prima posizione con un numero di record più che doppio rispetto al secondo posto, occupato da un altro fenomeno tipico delle dighe, il Piping nel corpo diga. Emerge comunque che il Piping, se si considera anche il terzo posto del Piping in fondazione, rimane un problema molto annoso che non può essere assolutamente trascurato. Significativo è anche il caso degli incidenti legati a sismi, che da solo superano le 150 unità e tendono ad essere studiati sempre più a fondo parallelamente al progredire dell'Ingegneria Sismica. Il numero di incidenti di causa ignota si mantiene entro una soglia accettabile, 135 record che anche successive ricerche rispetto ai database originari non sono riuscite a dirimere. Gli errori progettuali, sia in fase di definizione delle caratteristiche del materiale che nella gestione dei processi operativi, presentano una numerosità complessiva superiore ai 300 casi. L'ultima tipologia di incidente capace di sorpassare quota 100 è lo Sliding, che non a caso rappresenta un fenomeno molto diffuso per le dighe in terra o comunque per gli invasi che poggiano su fondazioni non solidissime. Tra le ultime posizioni, spiccano cause molto singolari, come Vegetation e Animal: in particolar modo per le dighe in terra, il rischio di interazione con le radici di piante parassite oppure con le tane di animali selvatici rimane piuttosto sensibile, per quanto tradizionalmente non connesso ad incidenti catastrofici. Interessanti sono

[154] Jandora, Riha, «The failure of embankment dams due to overtopping»

anche i 27 casi di incidenti scaturiti da azioni ambientali, come ad esempio oscillazioni di temperatura che inducono dilatazione termica.

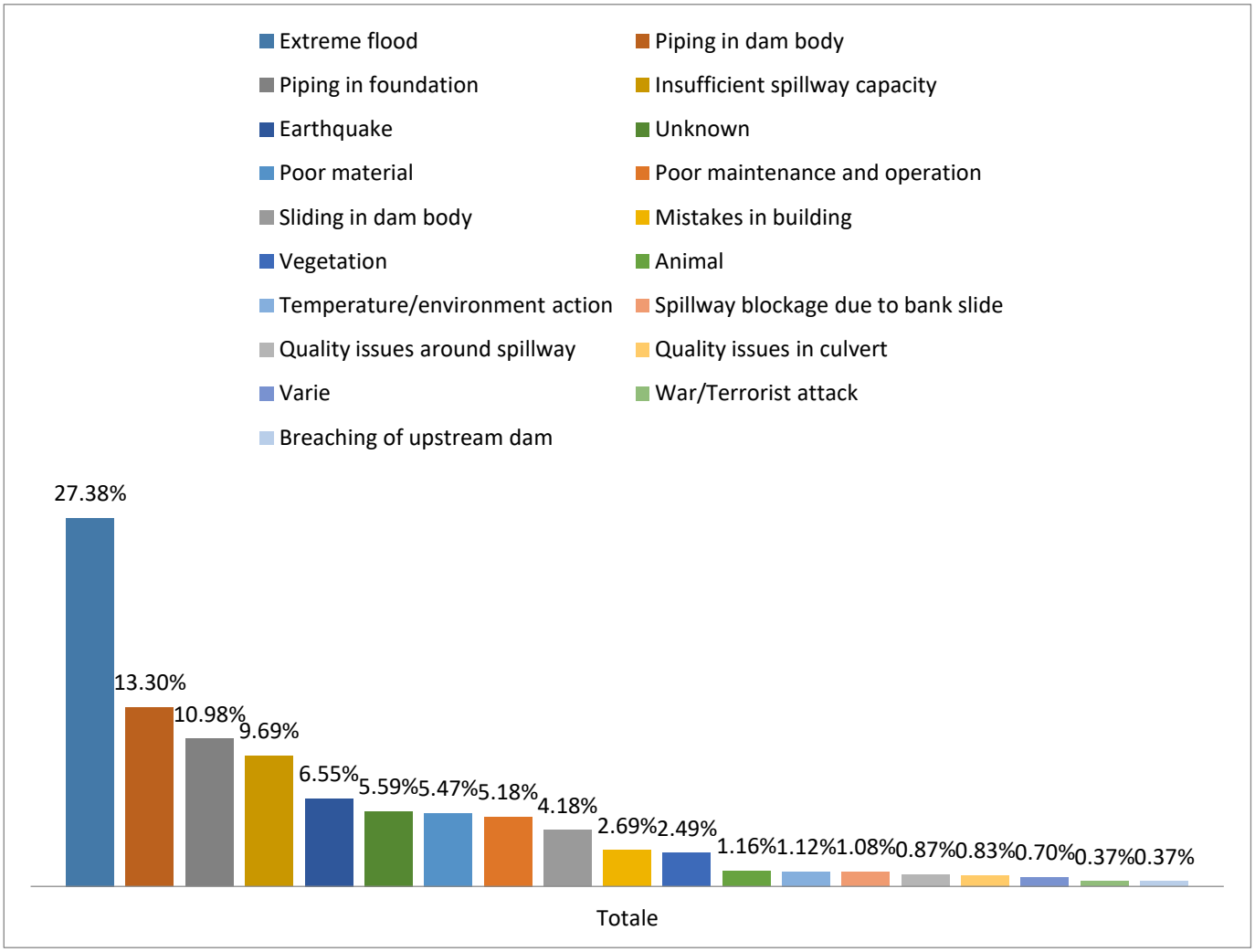


Figura 144 - Suddivisione percentuale delle dighe coinvolte da incidenti per Causa Specifica

La visualizzazione percentuale sottolinea con ancora maggior enfasi l'importanza relativa dell'Extreme Flood, che da solo arriva a coprire più di un quarto del database totale (Figura 144)[155]; allo stesso tempo, all'interno della categoria Overtopping, questa tipologia specifica rappresenta ben tre casi su quattro, in quanto l'Insufficient Spillway Capacity (quindi un incorretto dimensionamento dello sfioratore) non arriva al 10%. In mezzo a questi due si inseriscono i casi di Piping, separati da circa un 3%: sintomo che l'erosione tende maggiormente ad interessare il corpo della diga, pur non risultando assolutamente trascurabile per quanto riguarda le fondazioni. Un incidente su quindici è da imputarsi ai terremoti: una quota che impone sicuramente ragionamenti di salvaguardia della struttura, sia dall'azione diretta del sisma che dall'interazione con strutture adiacenti. Le criticità relative all'utilizzo improprio dei materiali o ad errori progettuali praticamente si equivalgono intorno al 5%, coprendo complessivamente un decimo del database totale. Lo stesso dicasi per lo Sliding e i Mistakes in Building, entrambi situati nei pressi del 2,5%, Tutti le altre tipologie di incidenti si suddividono abbastanza regolarmente la frazione rimasta, con una percentuale dell'1%. Fanalino di coda per le due sottocategorie del "Disasters", che presentano

[155]Keys, «PREPARING FOR DAM-FAILURE FLOODING»

la stessa quota molto bassa dello 0,37%: nel caso della rottura di bacino a monte, si tratta di un'occorrenza relativamente improbabile, mentre per quanto riguarda l'attacco terroristico, è confermata la tendenza a secretare buona parte degli incidenti per non allarmare l'opinione pubblica e mettere in cattiva luce le capacità di sicurezza della propria nazione.

Causa Specifica	Numero di piccole dighe
Piping in dam body	137
Extreme flood	105
Insufficient spillway capacity	79
Piping in foundation	71
Poor maintenance and operation	52
Earthquake	51
Unknown	48
Sliding in dam body	47
Poor material	22
Mistakes in building	20
Quality issues around spillway	13
Quality issues in culvert	13
Temperature/environment action	10
Varie	10
Breaching of upstream dam	8
War/Terrorist attack	7
Animal	4
Spillway blockage due to bank slide	2
Vegetation	1

Tabella 52 - Numero di piccole dighe coinvolte da incidenti per Causa Specifica

L'analisi limitata alle piccole dighe rivela che nessuna delle due cause specifiche relative all'Overtopping raggiunge la prima posizione (Tabella 52), pur mantenendo una numerosità assolutamente ragguardevole (intorno alle 100 unità in media). La ragione più quotata degli incidenti diventa infatti il Piping attraverso il corpo diga, che non a caso è uno dei rischi maggiori nell'ambito di dighe in terra, che costituiscono la parte più nutrita della popolazione di piccole dighe[156]. Questa sensibilità ai fenomeni erosivi viene ribadita dalla presenza in quarta posizione dell'analogo fenomeno di Piping che interessa invece le fondazioni dell'opera (meno frequente in quanto tendenzialmente le fondazioni si presentano più resistenti, anche a causa dell'azione autocompattante indotta dal peso proprio). A seguire troviamo problemi più vicini all'ambito strutturale, ovvero una cattiva gestione delle operazioni di manutenzione e l'impatto dei sismi. Oltre ad una cinquantina di casi non documentati in termini di tipologia di evento, l'unica categoria significativa dal punto di vista delle numerosità resta lo Sliding, fenomeno che giustamente non dipende spesso dall'entità della struttura, bensì dalle caratteristiche del terreno sottostante. Tra le cause invece meno diffuse è possibile rintracciare quelle che rientrano nella macrocategoria "Varie", ovvero nate dall'interazione tra la diga e l'ambiente circostante, in termini di vegetazione

[156] Ajibade, «Seepage Problems in Dams»

parassita (un solo caso documentato) o di roditori (4 record). In compenso, appare sorprendentemente alto il numero di casi di attacchi terroristici, che normalmente dovrebbero interessare gli invasi maggiori nell'ottica di suscitare risonanza a livello internazionale: è altresì vero che, negli ultimi anni, si è assistito ad un generale rinforzo delle misure di sicurezze per scongiurare attacchi deliberati a strutture di importanza nazionale; di conseguenza, è plausibile immaginare che il focus degli attentatori possa essersi spostato sui bacini di dimensioni contenute, nella maggior parte dei casi sguarniti e sensibilmente più vulnerabili.

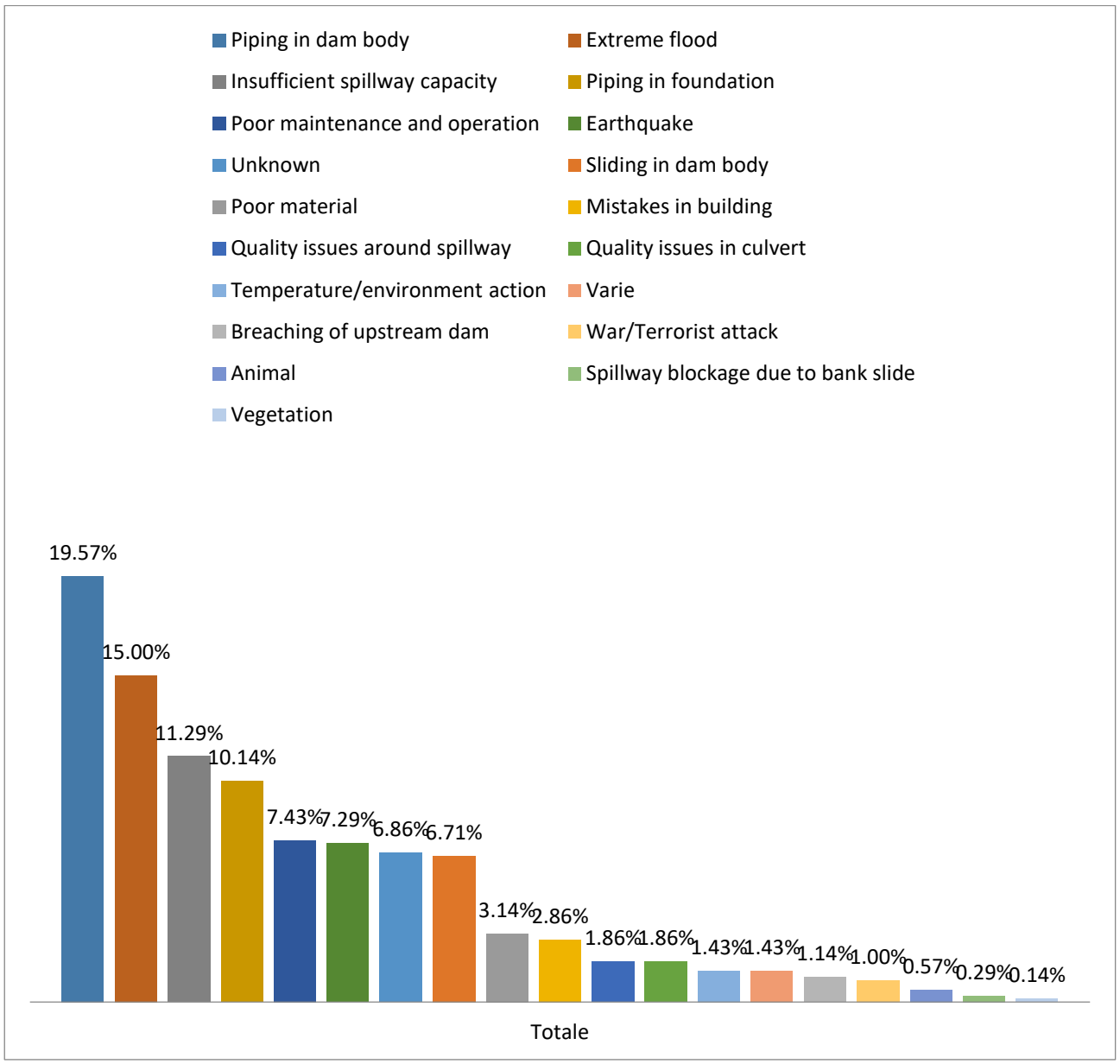


Figura 145 - Suddivisione percentuale delle piccole dighe coinvolte da incidenti per Causa Specifica

La rappresentazione tramite istogramma percentuale rivela che esiste un gap tutto sommato contenuto tra il primo e il secondo posto (Figura 145), ovvero tra il Piping attraverso il corpo diga e l'Overtopping in seguito a precipitazione eccessiva, segno che si tratta in entrambi i casi di problematiche che colpiscono in maniera significativa le piccole dighe (arrivando a coprire

complessivamente più di un terzo dei record totali). L'equilibrio sostanziale tra i problemi di filtrazione interna e il superamento si ripercuote anche sulla Insufficient Spillway Capacity e il Piping in foundation, distanti tra loro poco più di un punto percentuale. Questo perché, se da un lato è innegabile che l'overtopping costituisca uno dei maggiori rischi per gli invasi più piccoli, non si può escludere la sensibilità intrinseca delle dighe minori (quindi meno monitorate) a fenomeni erosivi, che tra l'altro in questo ambito possono contare su un percorso di filtrazione più contenuto (dato lo spessore minore del paramento e/o della fondazione). Al di fuori di queste tipologie di incidente, si innestano due blocchi pressoché equivalenti in termini di occorrenza relativa, a ribadire come sia difficile individuare una gerarchia di incidente anche per le piccole dighe.

Causa Specifica	**Numero di grandi dighe**
Extreme flood	556
Piping in foundation	194
Piping in dam body	184
Insufficient spillway capacity	155
Poor material	110
Earthquake	107
Unknown	87
Poor maintenance and operation	73
Vegetation	59
Sliding in dam body	54
Mistakes in building	45
Spillway blockage due to bank slide	24
Animal	24
Temperature/environment action	17
Quality issues around spillway	8
Varie	7
Quality issues in culvert	7
War/Terrorist attack	2
Breaching of upstream dam	1

Tabella 53 - Numero di grandi dighe coinvolte da incidenti per Causa Specifica

Per quanto riguarda le grandi dighe, la distribuzione appare fortemente regolare (Tabella 53) ad eccezione dell'immenso divario che intercorre tra la prima posizione (occupata dall'Extreme Flood) e la seconda (Piping in Foundation). Si parla addirittura di 350 record di differenza, con una numerosità quasi tripla. Tale dato sembra in controtendenza con quello che ci si può attendere, visto che i problemi di overtopping dovrebbero colpire con maggiore frequenza gli invasi più piccoli, per la loro ridotta capacità di contenere surplus idrici; non va tuttavia dimenticato che spesso le grandi dighe vengono costruite in prossimità di corsi d'acqua ad elevata portata o bacini naturali ampi, per compensare i costi di cantiere. Dato questo ambiente circostante, un'alluvione intenso potrebbe generare effetti incontenibili anche per invasi imponenti. Invece, è plausibile che il numero di incidenti dovuti al Piping attraverso la fondazione superi quelli causati dallo stesso fenomeno, ma in

corrispondenza del paramento[157]; basti considerare che all'aumentare dell'altezza dell'invaso, la porzione di terreno sottostante è sottoposta ad un carico sempre maggiore (con aumento delle tensioni interne), mentre lo spessore del paramento tende ad aumentare e ad offrire una barriera maggiormente affidabile.

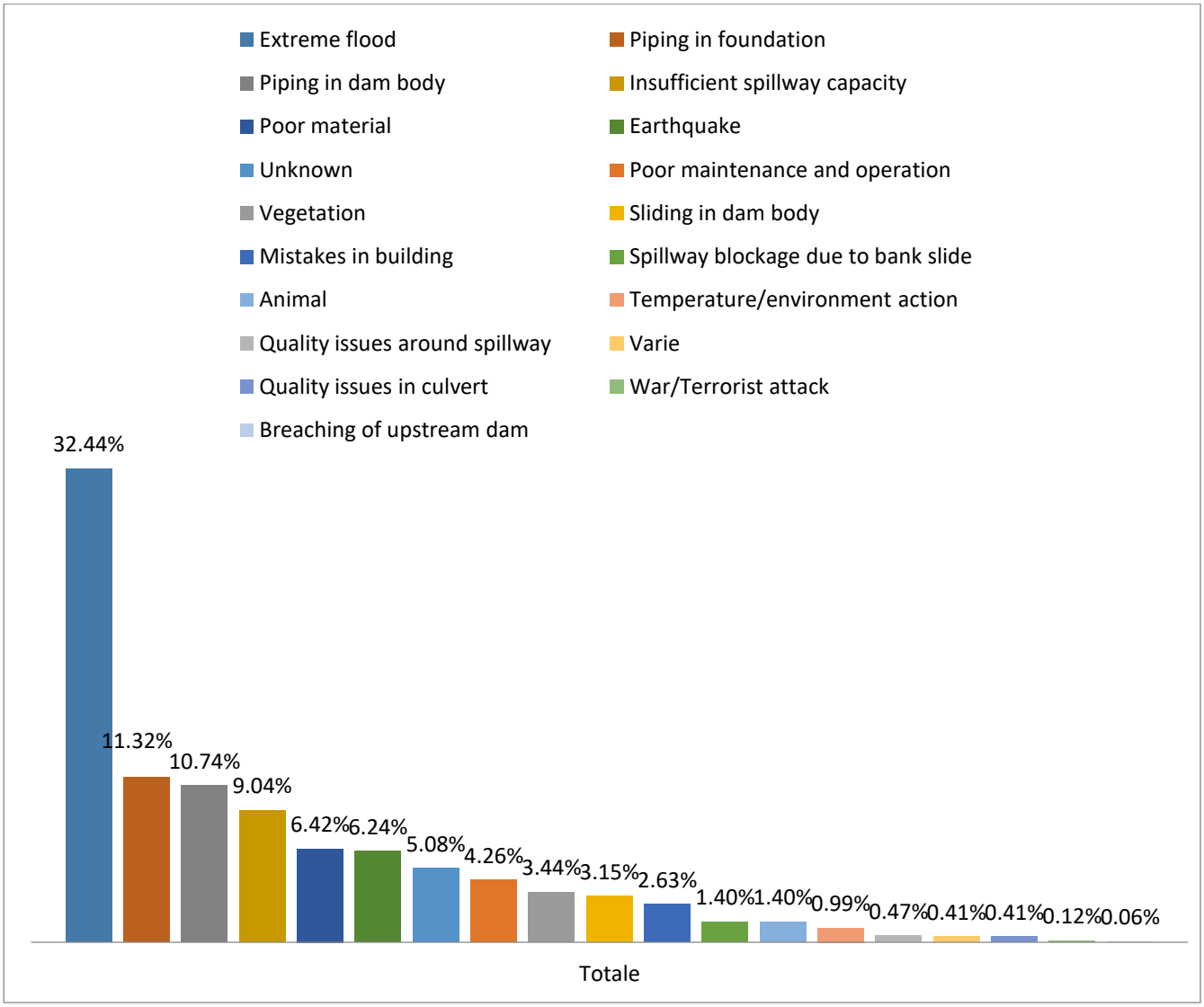


Figura 146 - Suddivisione percentuale delle grandi dighe coinvolte da incidenti per Causa Specifica

La distribuzione percentuale conferma quanto registrato in precedenza (Figura 146): un gap di più di 20 punti percentuali tra la prima e la seconda posizione e a seguire il decremento appare singolarmente regolare, con una distanza compresa tra 0,5 e 1% per ogni passaggio tra una tipologia di incidente e la successiva. Ancora una volta si evidenzia l'estrema eterogeneità delle cause scatenanti degli incidenti, da cui si deduce la necessità di progettare gli invasi in modo tale che possano reagire efficacemente a tutta una serie di stimoli ambientali diversi.

[157] Tate, «Piping Failure of the Poipi Reservoir»

4.1.10 Distribuzione per Crollo/No Crollo

Crollo	Numero di dighe
No	1826
Yes	1496
Unknown	339

Tabella 54 - Numero di grandi dighe coinvolte da incidenti per Crollo/No Crollo

La suddivisione per categorie all'interno del presente paragrafo si presenta naturalmente molto ridotta: si tratta di un approfondimento sulle conseguenze dell'incidente, per verificare se effettivamente vi sia stato un decorso catastrofico o se al contrario si sia arrivati al massimo ad un superamento dello stato limite di esercizio (Tabella 54). Ovviamente, è stato necessario accorpare eventi dannosi che non appartenevano nettamente all'una o all'altra categoria: ad esempio, quando si verifica una perdita parziale attraverso il corpo diga, la cui entità non è pero di per sé sufficiente a costituire un rischio sensibile per l'area a valle; per questi casi in zona grigia si è scelto di valutare ogni singolo record in maniera indipendente, sulla base eventualmente di approfondimenti, anche della documentazione fotografica. Permane inevitabilmente una quota di incidenti per cui non è stato possibile risalire in alcun modo alle conseguenze dell'incidente: si tratta comunque di poco più di 300 incidenti su un totale di circa 3600, quindi si ritiene esaustivo l'approfondimento. La differenza tra No (incidente non catastrofico) e Yes (incidente catastrofico) è di circa 300 casi, a favore del No: come è lecito attendersi, anche quando non si riesce ad evitare il verificarsi del fenomeno dannoso, l'occorrenza del crollo è limitata, anche se piuttosto significativa. A questo proposito, va anche sottolineato come l'interesse di chi si occupa di registrare tali statistiche (sia in ambito di pubblicazioni scientifiche che per quanto riguarda i database) può essere influenzato maggiormente dai casi più disastrosi.

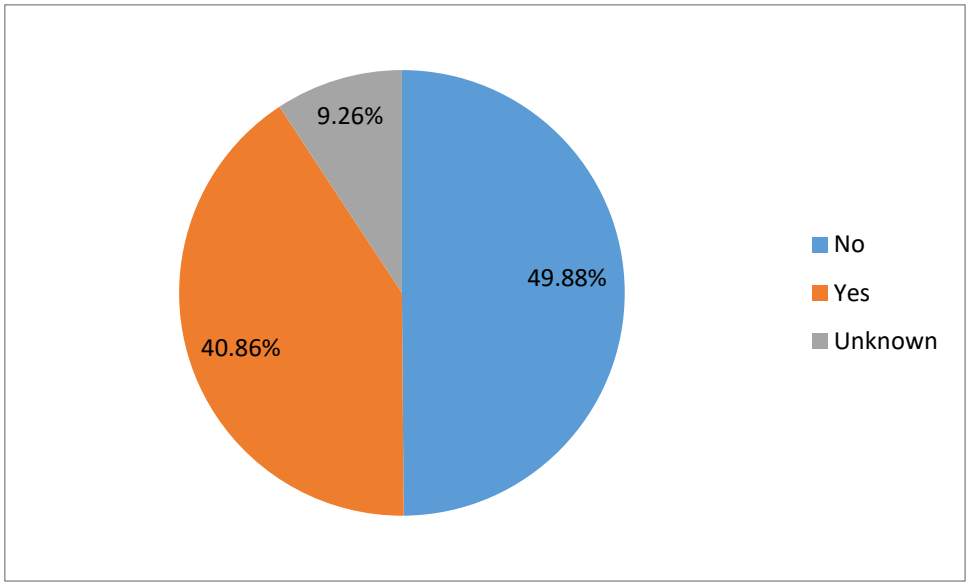


Figura 147 - Suddivisione percentuale delle dighe coinvolte da incidenti per Crollo/No Crollo

Visualizzando sotto forma di percentuali i risultati commentati sopra (Figura 147), emerge chiaramente come esattamente un record su due non produca conseguenze catastrofiche, mentre poco più del 40% del totale sfocia invece in un collasso dell'opera o comunque in condizioni

ritenute irrecuperabili con un intervento ordinario. Meno del 10% dei casi complessivamente ospitati all'interno del database non ha avuto la possibilità di essere inserito in alcuna delle due categorie per la scarsità di dati a disposizione in merito, oppure perché non era chiaro a quale dei due scenari limite potesse appartenere (la seconda opzione risulta comunque poco frequente, in quanto si è cercato in ogni modo di affinare l'analisi per limitare la numerosità dei casi non documentati in questo senso, vista l'estrema semplicità della categoria).

Crollo/No Crollo	Numero di piccole dighe
No	272
Yes	86
Unknown	39

Tabella 55 - Numero di piccole dighe coinvolte da incidenti per Crollo/No Crollo

Come di consueto, il campione limitato alle piccole dighe costituisce una frazione contenuta del database complessivo (Tabella 55); di conseguenza, i risultati che scaturiscono dalla sua analisi vanno considerati solo parzialmente robusti e dipendenti fortemente dall'attenzione dei ricercatori nei confronti di determinati parametri (ad esempio è lecito attendersi che il focus sulle piccole dighe in terra sia meno significativo in proporzione rispetto alle piccole dighe Rockfill, considerata l'elevatissima densità delle prime con conseguente ampia disponibilità di dati che non richiederebbe eccessivi approfondimenti). Al netto di questa premessa, i risultati che si possono evincere appaiono in linea con le aspettative: il numero di dighe che risultano effettivamente crollate in seguito al verificarsi dell'incidente si riduce sensibilmente se confrontato con quelle rimaste in piedi, che sfiorano le 300 unità contro meno di 100 nel primo caso[158]. Il numero di incidenti per cui non è stato possibile determinare in maniera univoca le conseguenze si attesta su un prevedibile numero di 39 elementi, proporzionale a quello del database complessivo.

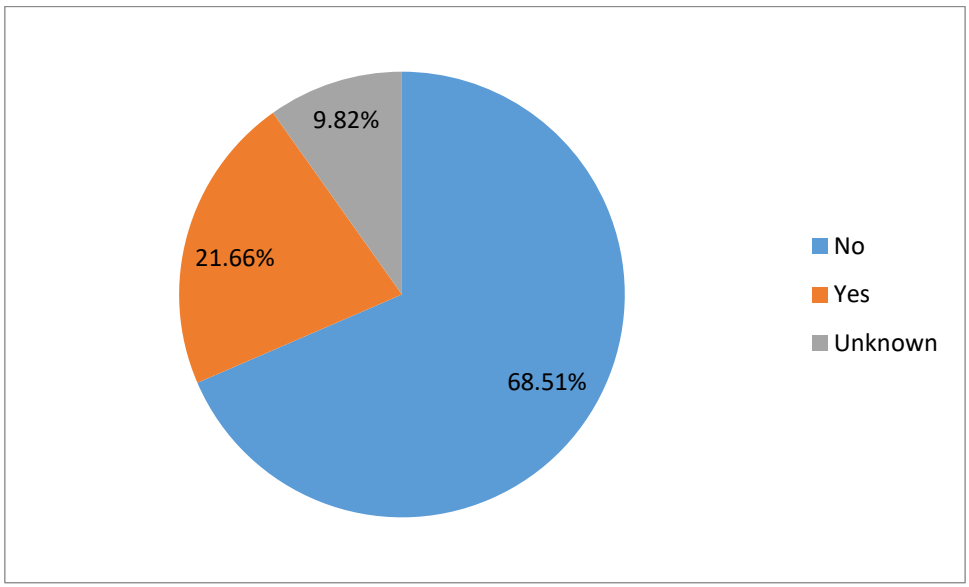


Figura 148 - Suddivisione percentuale delle piccole dighe coinvolte da incidenti per Crollo/No Crollo

[158]Evans, Gill et al. , «Lesson from a dam failure»

Se in precedenza, analizzando il database nella sua complessità, appariva che un incidente su due fosse privo di danni irreparabili e/o catastrofici, nell'ambito di piccole dighe la percentuale sale oltre i due terzi, sintomo di come sia più semplice gestire gli incidenti per gli invasi minori, una volta che non si è potuto evitare il loro verificarsi (Figura 148): si tratta della natura conseguenza delle dimensioni ridotte in gioco, che rendono più semplice un intervento attivo anche nel corso del fenomeno dannoso. La percentuale di dighe Unknown rimane pressoché costante, di conseguenza a ridursi in maniera assolutamente non trascurabile è la quota di incidenti degenerati in crolli o collassi dell'opera, che ora faticano a superare il 20% (poco più di un invaso su cinque).

Crollo/No Crollo	Numero di grandi dighe
No	1515
Yes	679
Unknown	218

Tabella 56 - Numero di grandi dighe coinvolte da incidenti Crollo/No Crollo

Il campione rappresentato dalle grandi dighe appare decisamente più robusto: si registrano poco più di 1500 incidenti non catastrofici, circa 700 con conseguenze disastrose e 218 a cui non è stato possibile attribuire una categoria precisa (Tabella 56). Ancora una volta si ribadisce, contrariamente a quanto si poteva superficialmente immaginare, come solo una quota limitata di incidenti tenda a degenerare al punto tale da risultare incontrollabile.

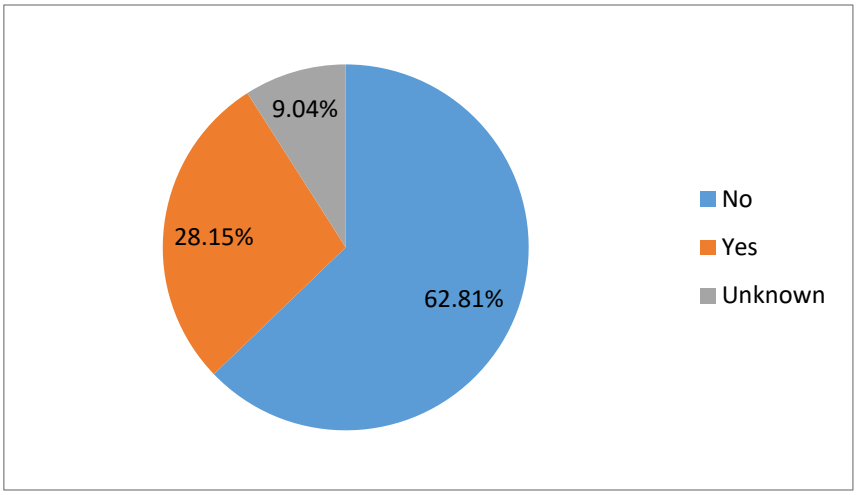


Figura 149 - Suddivisione percentuale delle grandi dighe coinvolte da incidenti per Crollo/No Crollo

Nello specifico, i casi di incidente contenuto si installano sempre intorno ai due terzi della sezione Large Dams dal database, pur se con una percentuale leggermente inferiore alle Small Dams: questo gap di alcuni punti percentuali viene pressoché interamente assorbito dagli incidenti catastrofici, che ora si avvicinano al 30% (Figura 149). Si tratta di una naturale conseguenza della maggiore difficoltà di gestire criticità all'interno di invasi più imponenti. L'occorrenza relativa degli incidenti non classificati, invece, resta costante e al di sotto del 10%.

4.1.11 Distribuzione per Età

	Età MIN [anni]	Età MAX [anni]
Classe 1	0	1
Classe 2	1	5
Classe 3	5	10
Classe 4	10	20
Classe 5	20	30
Classe 6	30	50
Classe 7	50	75
Classe 8	75	100
Classe 9	100	200
Classe 10	200	400

Tabella 57 - Suddivisione in Classi per Età delle dighe coinvolte da incidenti

L'età di una diga è rappresentata da una variabile che all'interno del database viene definita come la sottrazione tra l'anno di incidente e quello di costruzione, ove quest'ultimo sia noto con certezza (la data del fenomeno dannoso risulta invece sempre definita). Il ricorso a questo parametro consente da un lato di correlare in maniera indiretta la distribuzione per anno di costruzione con quella dell'anno di incidente (Tabella 57), ma, cosa ancora più importante, rappresenta un indicatore della capacità delle dighe di sopportare il naturale degrado connesso allo scorrere del tempo e a valutare quale può essere la reale vita utile degli invasi. Sulla base di queste necessità, si è scelto di definire dieci classi di età che si infittiscono in prossimità dei valori più bassi, a causa della profonda differenza di comportamento per una diga che crolla, ad esempio, nel primo anno di vita rispetto ad una che dura alcuni anni. Naturalmente, si sottolinea che l'età viene calcolata senza tenere conto del giorno e del mese (quindi, paradossalmente, una diga costruita il 31 dicembre dell'anno X e crollata il primo gennaio dell'anno X+1 risulterebbe avere un'età di un anno), a causa dell'esagerato sforzo di ricerca e computazionale che questo affinamento richiederebbe; è inoltre evidente che tale bias tende ad attenuarsi in misura sempre maggiore con l'aumentare della classe e di conseguenza del range di età. L'età massima è stata posta in corrispondenza dei 400 anni, in quanto non sono noti invasi posteriori al XVII secolo ancora in piedi, a meno di rinnovamenti successivi oppure dimensioni talmente contenute da non meritare la registrazione all'interno di un database.

	Età MIN	Età MAX	Numero di dighe
Classe 1	0	1	136
Classe 2	1	5	126
Classe 3	5	10	69
Classe 4	10	20	123
Classe 5	20	30	178
Classe 6	30	50	426
Classe 7	50	75	290
Classe 8	75	100	270
Classe 9	100	200	168
Classe 10	200	400	3

Tabella 58 - Numero di dighe coinvolte da incidenti per Età

La suddivisione in classi proposta sopra genera una distribuzione piuttosto singolare (Tabella 58). In primo luogo, la numerosità delle dighe che hanno subito incidenti nel primo anno di vita equivale praticamente quella degli invasi che sono andati incontro a criticità dal secondo al quinto anno dalla costruzione. In questo caso si tratta di valori pressoché equivalenti, sintomo di una distribuzione piuttosto equilibrata tra le due classi (a sostegno della tesi secondo cui il periodo immediatamente successivo alla costruzione sia uno dei più critici). Nella Classe 3, tra i 5 e i 10 anni di età, si assiste ad un brusco calo della numerosità, probabilmente in quanto si è superato il periodo più critico in cui possono verificarsi problematiche direttamente correlate alle modalità costruttive. A seguire la numerosità tende ad aumentare con regolarità fino alla Classe 6 (30-50 anni), che non a caso rappresenta la vita utile della maggior parte degli invasi, almeno secondo le normative occidentali (50 anni)[159]. A seguire si assiste all'inevitabile declino dell'occorrenza relativa, principalmente per la difficoltà da parte delle dighe di resistere più a lungo di un secolo, valore oltre al quale la numerosità scende nuovamente al di sotto delle 200 unità; a questo fenomeno di difficoltà di invecchiamento oltre una certa soglia si unisce ovviamente la densità fortemente contenuta di bacini costruiti prima del XX secolo, gli unici che potrebbero spingersi verso le ultime classi, per ora. Va sottolineato infine il dato estremamente basso delle dighe con età superiore ai 200 anni: appena 3, ultimi esempi di strutture realizzate in età pre-industriale.

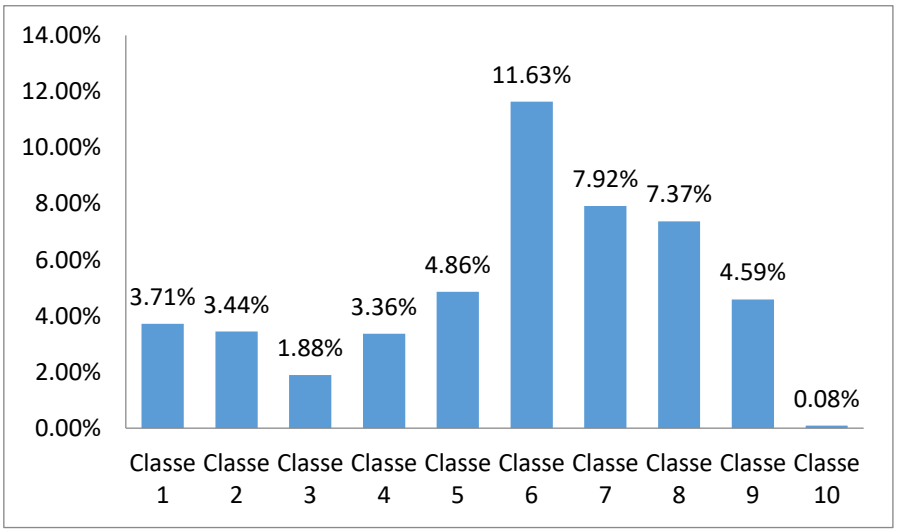


Figura 150 - Suddivisione percentuale delle dighe coinvolte da incidenti per Classi di Età

La distribuzione percentuale fotografa un andamento altamente prevedibile, ovvero una campana dotata di picco in posizione centrale (Figura 150); la singolarità è tuttavia costituita dal minimo relativo che si registra in corrispondenza della Classe 3, inferiore al 2%, a cui si arriva dopo percentuali comparabili con le Classi 4 e 5: la sensibilità delle dighe agli incidenti nei primissimi anni di vita appare quindi dello stesso ordine di grandezza della fascia 10-30, ovviamente sulla base di problematiche diverse (ad esempio a causa di cattivo design per gli invasi più giovani e di deterioramento del materiale per quelli più vecchi). Le percentuali dopo il picco della Classe 6 sono stabilmente maggiori di quelle precedenti al massimo, a testimoniare come la durata degli invasi, grazie a manutenzione continua, può ragionevolmente superare l'età attesa.

[159]Wieland, «Life-span of storage dams»

	Età MIN	Età MAX	Numero di dighe
Classe 1	0	1	15
Classe 2	1	5	21
Classe 3	5	10	11
Classe 4	10	20	17
Classe 5	20	30	24
Classe 6	30	50	82
Classe 7	50	75	44
Classe 8	75	100	50
Classe 9	100	200	25
Classe 10	200	400	1

Tabella 59 - Numero di piccole dighe coinvolte da incidenti per Classi di Età

Compatibilmente con il campione più limitato, il numero di piccole dighe in ogni categoria tende a ridursi sensibilmente, mantenendo comunque un andamento analogo (Tabella 59). Si nota tuttavia come la diminuzione sulla Classe 1 sia perfino più pronunciata della Classe 2, in quanto le piccole dighe tendono ad essere meno soggette ad incidenti nel primo anno di vita: si tratta infatti di criticità relative alla modalità costruttive, che nel caso di invasi minori risultano meno ardite e quindi meno rischiose. Altre evidenze significative sono da ricercare nella Classe 6, quella di picco, che presenta una numerosità molto elevata rispetto alle altre; giustamente, per i bacini di altezza inferiore ai 15 metri non è forzatamente richiesta un'operatività che superi stabilmente i 50 anni, in quanto l'investimento per realizzarli rimane relativamente contenuto e di conseguenza, contrariamente alle opere maggiori, possono essere ricostruiti con maggiore frequenza. Si nota infine la presenza di un solo invaso con età superiore ai 200 anni.

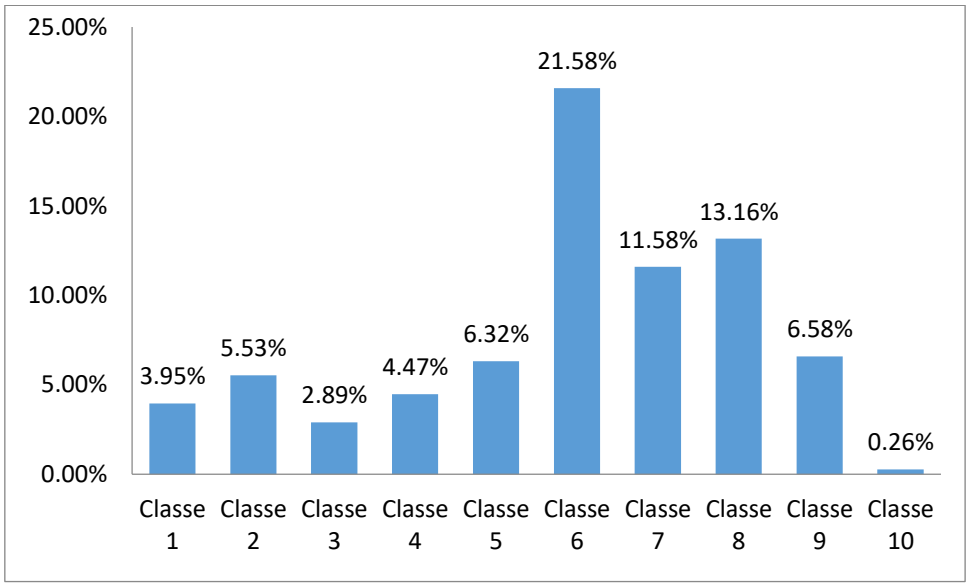


Figura 151 - Suddivisione percentuale delle piccole dighe coinvolte da incidenti per Classi di Età

La distribuzione in termini percentuali rivela un andamento sensibilmente più irregolare, caratterizzato dalla presenza di un alto numero di massimi e minimi relativi (Figura 151). Più di una diga su cinque ricade nella Classe 6, in accordo con la vita utile media degli invasi.

Sorprendentemente, le piccole dighe con età compresa tra i 75 e i 100 anni sono leggermente più numerose di quella della Classe precedente, probabilmente a causa di inevitabili oscillazioni statistiche. Molto bassa anche la quota di piccole dighe di età compresa tra i 5 e i 10 anni, un periodo in cui l'attenzione per l'invaso è massima in quanto corrisponde ad una delle fasi di maggiore attività dell'invaso[160].

	Età MIN	Età MAX	Numero di dighe
Classe 1	0	1	129
Classe 2	1	5	121
Classe 3	5	10	68
Classe 4	10	20	114
Classe 5	20	30	164
Classe 6	30	50	412
Classe 7	50	75	275
Classe 8	75	100	259
Classe 9	100	200	163
Classe 10	200	400	3

Tabella 60 - Numero di grandi dighe coinvolte da incidenti per Classi di Età

Le suddivisioni in classi per le grandi dighe sembra andare in parallelo rispetto a quella del database complessivo, anche a causa della netta preponderanza di record al di sopra dei 15 metri (Tabella 60). Ancora una volta, infatti, si parte da un valore significativo per la Classe 1 che si riduce di poche unità per la Classe 2 e invece crolla in Classe 3. In seguito, si registra nuovamente un picco molto pronunciato in Classe 6 che procede con un decremento lento fino alla Classe 9, per finire con l'ultima Classe che consta di pochissimi record.

4.1.12 Distribuzione per Volume di Invaso

	Vol MIN [10^3 mc]	Vol MAX [10^3 mc]
Classe 1	0	10
Classe 2	10	100
Classe 3	100	1000
Classe 4	1000	10000
Classe 5	10000	100000
Classe 6	100000	1000000
Classe 7	1000000	10000000
Classe 8	10000000	100000000
Classe 9	100000000	1000000000
Classe 10	1000000000	10000000000

Tabella 61 - Suddivisione in Classi di Volume di Invaso per le dighe

[160] Wieland, «Life-span of storage dams»

La suddivisione in Classi prevista per il Volume di Invaso riprende direttamente quella proposta per le grandi dighe (Tabella 61): in particolare, si sottolinea come l'unità di base non venga posta in corrispondenza del metro cubo, in quanto ritenuta fortemente riduttiva per le capacità in gioco, bensì una più realistica di 1000 mc. La successiva distribuzione segue una legge matematica estremamente lineare: il massimo della fascia successiva deriva dalla moltiplicazione per un fattore 10 del limite superiore di quella precedente. Infine, anche se ormai si è appurato che la Classe più alta copre una fascia così ampia da risultare vuota, si è deciso di conservarla per mantenere una sistema a 10 classi facilmente correlabili con le altre suddivisioni analoghe.

	Vol MIN [10^3 mc]	Vol MAX [10^3 mc]	Numero di dighe
Classe 1	0	10	3381
Classe 2	10	100	43356
Classe 3	100	1000	110726
Classe 4	1000	10000	93637
Classe 5	10000	100000	22812
Classe 6	100000	1000000	7569
Classe 7	1000000	10000000	3601
Classe 8	10000000	100000000	2447
Classe 9	100000000	1000000000	36
Classe 10	1000000000	10000000000	0

Tabella 62 - Numero di dighe per Classi di Volume di Invaso

La distribuzione numerica delle dighe nel loro complesso secondo la categorizzazione appena illustrata si presenta in linea con le aspettative (Tabella 62): il picco massimo si colloca non al centro della distribuzione, ma spostato leggermente verso sinistra (quindi per volumi di invaso più contenuti). Inoltre, se la salita dalle Classi inferiore appare piuttosto ripida, lo stesso non si può dire del decremento post picco che si configura molto più soft all'inizio, addirittura con una vicinanza molto stretta tra la numerosità in Classe 3 e in Classe 4 (entrambe nell'ordine di 100 000 unità), per poi crollare rapidamente con la Classe 5 e tornare ad essere regolare con le Classi 6-8. La Classe 9 (l'ultima ad essere realmente popolata) presenta una numerosità pressoché trascurabile, in quanto fa riferimento ad una capacità di invaso superiore a 10^8, compatibile unicamente con i bacini più imponenti ed eccezionali.

	Vol MIN [10^3 mc]	Vol MAX [10^3 mc]	Numero di dighe
Classe 1	0	10	102
Classe 2	10	100	640
Classe 3	100	1000	724
Classe 4	1000	10000	416
Classe 5	10000	100000	258
Classe 6	100000	1000000	113
Classe 7	1000000	10000000	24
Classe 8	10000000	100000000	0
Classe 9	100000000	1000000000	0
Classe 10	1000000000	10000000000	0

Tabella 63 - Numero di dighe coinvolte da incidenti per Classi di Volume di Invaso

Se si passa alla visualizzazione per il database incidenti, l'andamento appare in prima analisi simile (fermo restando la necessità di approfondire i rapporti percentuali, Tabella 63), anche se il picco risulta spostato a metà tra la Classe 2 e la Classe 3 (quindi circa un Classe prima della distribuzione delle dighe). Inoltre, risultano assenti le dighe a partire dalla Classe 8, quindi gli incidenti documentati sono documentati unicamente fino a 10^7 mc.

	Vol MIN [10^3 mc]	Vol MAX [10^3 mc]	Frequenza relativa
Classe 1	0	10	3.02%
Classe 2	10	100	1.48%
Classe 3	100	1000	0.65%
Classe 4	1000	10000	0.44%
Classe 5	10000	100000	1.13%
Classe 6	100000	1000000	1.49%
Classe 7	1000000	10000000	0.67%
Classe 8	10000000	1E+08	0.00%
Classe 9	1E+08	1E+09	0.00%
Classe 10	1E+09	1E+10	ND

Tabella 64 - Frequenza relativa degli incidenti per Classi di Volume di Invaso

Mettendo a confronto le due distribuzioni numeriche (Tabella 64), si ottiene una serie di rapporti piuttosto interessante: frequenze comprese tra lo 0,5% e il 3%, che possono sembrare realistiche in base alle informazioni raccolte finora. Le Classi che appaiono più critiche sono, nell'ordine, la Classe 1, la Classe 6, la Classe 5 e la Classe 2, le uniche al di sopra del punto percentuale. Il picco di incidenti (a livello proporzionale) per le dighe ad invaso minore, apparentemente le meno impegnative, può spiegarsi con la sottovalutazione dei pericoli per invasi che spesso hanno un carattere locale e non sono interessate dalla corretta attenzione nei confronti della sicurezza; una condizione condivisa ovviamente, anche se in misura minore, con la Classe immediatamente successiva. L'occorrenza relativa sulle Classi intermedie è invece compatibile con la combinazione di invasi notevoli, quindi gestibili con maggiore fatica e dispendio di risorse,

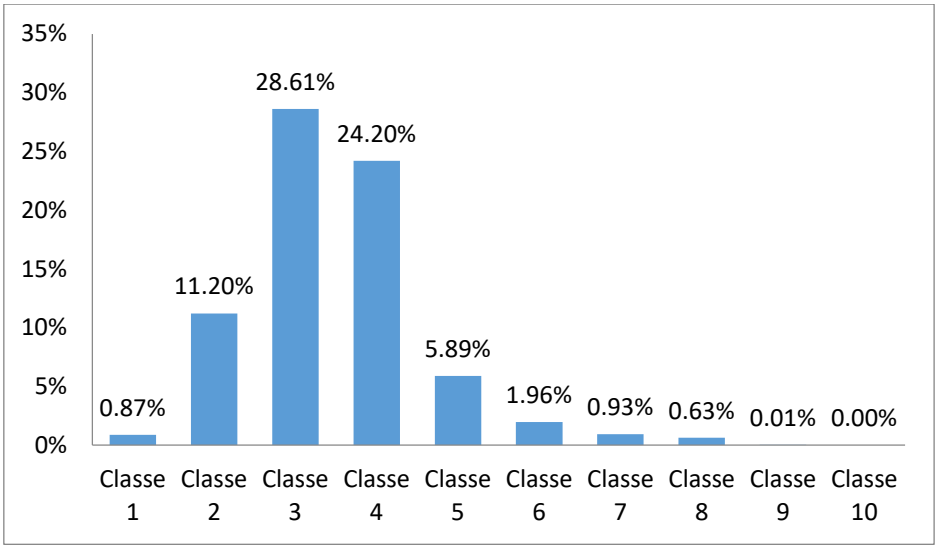


Figura 152 - Suddivisione percentuale delle dighe per Classi di Volume di Invaso

La modalità di visualizzazione tramite istogramma (Figura 152) consente di realizzare meglio l'andamento "a campana" (per quanto ovviamente su base discreta) dei dati sul Volume di Invaso, con le Classi 3 e 4 che sommate arrivano a coprire più della metà dei record totali. Si nota poi come le ultime classi presentino percentuali davvero contenute, spesso inferiori al 2%, segno che gli invasi raramente superano i 100 000 mc (in quanto non vi è per la maggior parte dei casi la necessità di accumulare un tale volume di acqua, se non per funzioni ben definite che coinvolgono soltanto un numero limitato di invasi, per lo più a carattere idroelettrico). Addirittura, soltanto un invaso su 10 000 arriva a superare i 10^8 mc. Si nota infine lo squilibrio tra la Classe a valle del picco e di quella a monte: alla prima compete una percentuale che è più che doppia rispetto alla seconda: al di là delle dighe più comuni, quelle ricadenti in Classe 3, a livello di bacino si tende in maniera privilegiata a costruire dighe leggermente più capienti[161].

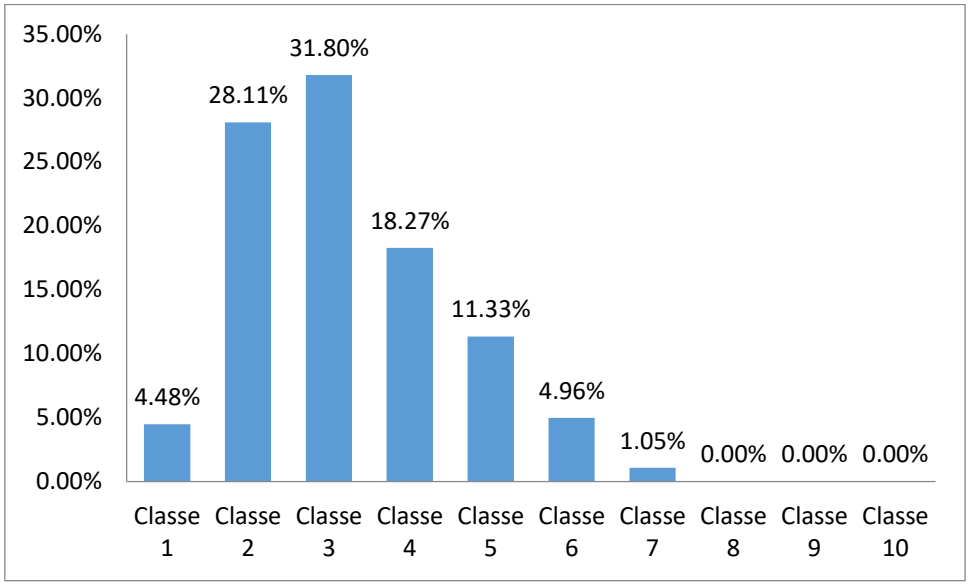


Figura 153 - Suddivisione percentuale delle dighe coinvolte da incidenti per Classi di Volume di Invaso

La stessa suddivisione, applicata alle dighe coinvolte da incidenti e raccolte nel database, genera un andamento simile (Figura 153), in cui però spicca la preponderanza del ramo ascendente dell'ideale curva a campana che ripercorre le barre dell'istogramma, tanto che la Classe 2 e la Classe 3 sono distanziati da poco più di 3 punti percentuali (e nel complesso coprono quasi il 60% del database totale), mentre la Classe 4 arriva appena al 18%. Inoltre, la Classe 1 risulta quattro volte maggiore dell'equivalente sul database complessivo di dighe, a causa della cattiva gestione degli invasi più piccoli, ritenuti ingiustamente caratterizzati da un alto livello intrinseco di sicurezza.

[161] World Commission of Dams, «Dams and Development: A New Framework for Decision-Making»

	Vol MIN [10^3 mc]	Vol MAX [10^3 mc]	Numero di piccole dighe
Classe 1	0	10	1121
Classe 2	10	100	29111
Classe 3	100	1000	20134
Classe 4	1000	10000	5586
Classe 5	10000	100000	1228
Classe 6	100000	1000000	340
Classe 7	1000000	10000000	127
Classe 8	10000000	100000000	87
Classe 9	100000000	1000000000	1
Classe 10	1000000000	10000000000	0

Tabella 65 - Numero di piccole dighe per Classi di Volume di Invaso

La distribuzione, secondo le stesse classi, delle sole piccole dighe conferma una correlazione attesa: il massimo della curva (ideale) si sposta verso sinistra, in quanto naturalmente risulta complesso realizzare invasi limitati in altezza a 15 metri che presentino allo stesso tempo un volume di invaso elevato (Tabella 65). La Classe 2 prende il sopravvento con un numero di piccole dighe superiore del 50% a quello della Classe immediatamente superiore (in ogni caso dotate di un'occorrenza notevole, dell'ordine rispettivamente delle 30 000 e delle 20 000 unità). Anche l'allineamento tra la numerosità in Classe 1 e quella in Classe 5 rispecchia la natura delle piccole dighe; degna di nota è infine la presenza di un'unica Small Dam al di sopra di 10^8 mc.

	Vol MIN [10^3 mc]	Vol MAX [10^3 mc]	Numero di piccole dighe
Classe 1	0	10	18
Classe 2	10	100	81
Classe 3	100	1000	120
Classe 4	1000	10000	86
Classe 5	10000	100000	31
Classe 6	100000	1000000	18
Classe 7	1000000	10000000	6
Classe 8	10000000	100000000	0
Classe 9	100000000	1000000000	0
Classe 10	1000000000	10000000000	0

Tabella 66 - Numero di piccole dighe coinvolte da incidenti per Classi di Volume di Invaso

Passando alla visualizzazione degli incidenti (limitata alle piccole dighe), si nota come la Classe 4 tenda addirittura a superare la Classe 2 (anche se di pochi elementi), e in parallelo a questo fenomeno il picco si sposta sulla Classe 3 (Tabella 66). Non sono inoltre pervenuti incidenti in Classe superiore alla 7. Si assiste quindi da un lato ad una maggiore preponderanza dell'altezza nella sensibilità degli invasi alle criticità (come è lecito attendersi, in quanto gli invasi più ampi, a parità di altezza, presentano sfide maggiori dal punto di vista ingegneristico); dall'altro, sembra che la documentazione degli incidenti si arresti improvvisamente oltre i 10^8 mc, per quanto il numero

di piccole dighe oltre questa soglia sia basso ma non del tutto trascurabile. Potrebbe trattarsi di un problema di registrazione dei dati, visto il campione di per sé di dimensioni contenute.

	Vol MIN [10^3 mc]	Vol MAX [10^3 mc]	Frequenza relativa incidenti
Classe 1	0	10	1.61%
Classe 2	10	100	0.28%
Classe 3	100	1000	0.60%
Classe 4	1000	10000	1.54%
Classe 5	10000	100000	2.52%
Classe 6	100000	1000000	5.29%
Classe 7	1000000	10000000	4.72%
Classe 8	10000000	1E+08	0.00%
Classe 9	1E+08	1E+09	0.00%
Classe 10	1E+09	1E+10	ND

Tabella 67 - Frequenza relativa degli incidenti di piccole dighe per Classi di Volume di Invaso

I ragionamenti esplicitati in maniera separata per le due tabelle precedenti possono essere ancora più chiaramente illustrati tramite la loro combinazione (Tabella 67): la frequenza relativa appare significativamente elevata in corrispondenza della Classe 1 e delle Classi 5-7: nel primo caso si tratta sicuramente di un bias connesso alla scarsità di dati sulle piccole dighe con invaso così limitato (a fronte di un numero di incidenti invece non trascurabile), mentre per le Classi più elevate ciò testimonia la difficoltà di mettere in sicurezza i bacini più estesi.

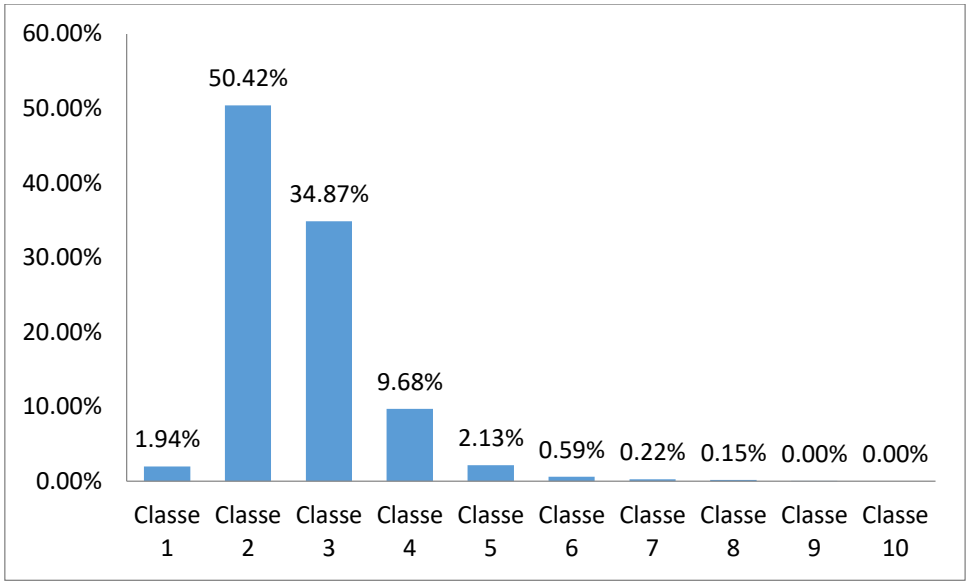


Figura 154 - Suddivisione percentuale delle piccole dighe per Classi di Volume di Invaso

La suddivisione percentuale delle piccole dighe evidenzia una notevole concentrazione degli invasi tra la Classe 2 e la Classe 3, per un totale complessivo superiore all'85% (Figura 154); addirittura, la sola Classe 2 raccoglie esattamente una diga su due. Ciò non deve stupire considerando la

limitazione in altezza dettata dall'appartenenza alla categoria Small Dam (15 metri di sviluppo verticale) e, tenuto conto della natura correlazione tra altezza e volume di invaso, si dimostra come la maggior parte delle opere di raccolta idraulica minori possano contare su un bacino non superiore ai 10^7 mc. Merita attenzione anche il fatto che al di là della Classe 5, comunque scarsamente popolata, la distribuzione si installi stabilmente al di sotto del punto percentuale, vista l'inefficienza di dighe inferiori ai 15 metri ma aventi bacini contenenti svariati miliardi di metri cubi d'acqua (per i quali sarebbe più indicato e ingegneristicamente agevole imporre un leggero aumento dell'altezza, ricadendo però nella definizione di Large Dam). Malgrado l'altezza contenuta, restano poco numerose anche le piccole dighe in Classe 1 (poco meno del 2%), segno della scarsa convenienza nel realizzare invasi capaci di immagazzinare meno di 10 000 mc[162].

Figura 155 - Suddivisione percentuale delle piccole dighe coinvolte da incidenti per Classi di Volume di Invaso

Pur conservando un unico picco posto nella parte sinistra del grafico, la distribuzione percentuale degli incidenti tende a traslarsi lievemente verso sinistra (Figura 155) e si presenta inoltre più omogenea tra le Classi coinvolte, a loro volta però inferiori rispetto alla popolazione di piccole dighe (le Classi 8 e 9 risultano vuote). Questa regolarità nella distribuzione induce un sostanziale equilibrio tra la Classe 2 e la Classe 4, che oltretutto non appaiono così distanti da quella di picco (la Classe 3, che si eleva per meno di dieci punti percentuali rispetto alle due più prossime). Inoltre, la Classe 1 che coinvolge gli invasi più piccoli raggiunge un ragguardevole 5%, sicuramente per ragioni di scarsa attenzione alla sicurezza per invasi ritenuti, a torto, al riparo da incidenti, oltre che per inevitabili bias di registrazione.

[162] Pohl, «A German guideline for Small Dams and small Flood Control Reservoir»

5 METODI DI ANALISI STATISTICA DEGLI INCIDENTI

5.1 Introduzione generale

5.1.1 Presentazione

Per comprendere la portata dell'impatto del comparto dighe sulle attività economiche e sull'ambiente, non si può prescindere da mostrare alcuni dati altamente significativi. Gli Stati Uniti rimangono il Paese che offre la documentazione più accurata in questo ambito, pertanto gran parte delle valutazioni verranno condotte all'interno dei loro confini. La scelta ad esempio di arrivare a costruire una popolazione di dighe che, al 2016, supera i 90000 elementi è dettata anche dall'esigenza di continuare a sostenere l'energia idroelettrica in quanto fonte sostenibile privilegiata. Tra queste 90000 dighe, più di 15 000 sono classificate come "High-Risk", ovvero presentano numerosi fattori di esposizione al pericolo di crollo: predisposizione delle fondazioni alla filtrazione, frequenti fenomeni di piena, terreno sottoposto con cadenza regolare a sismi intensi, tanto per citarne soltanto alcuni; circa un sesto di tale cifra viene inoltre ritenuto non adeguato alla classe di rischio a cui è sottoposto. Se si combinano questi dati eclatanti con la constatazione che l'età media degli invasi sfiora i 57 anni, la situazione inizia ad apparire critica; e eseguendo una proiezione futura, entro il 2025 il 70% delle dighe statunitensi dovrebbe superare i 50 anni di età, comportando una spesa governativa complessiva di circa 64 miliardi di dollari, dei quali 25 destinati unicamente a sopperire alle mancanze strutturali (Figura 156)[163].

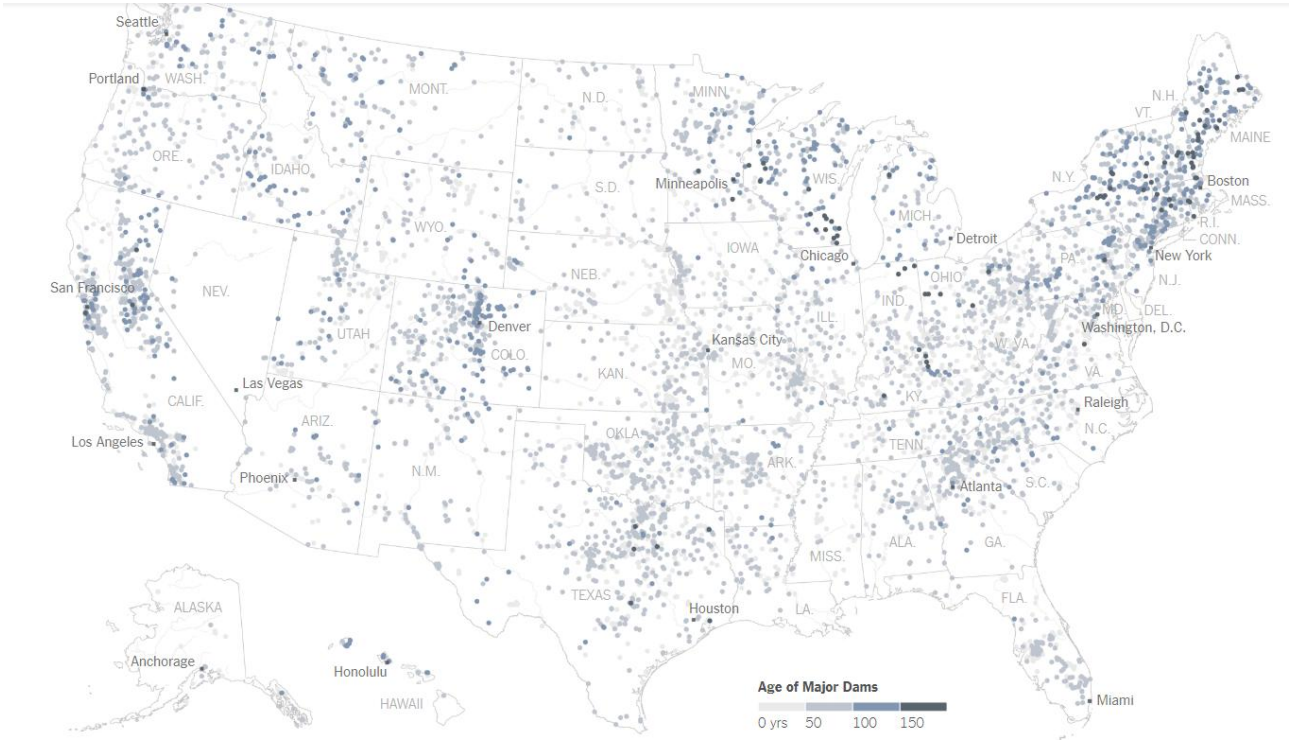


Figura 156 - Distribuzione delle dighe statunitensi sulla base dell'età

[163] Ho, Lall et al., «The future role of dams in the United States of America»

Nell'ottica di ottimizzare l'investimento pubblico, diventa cruciale la previsione del rischio operata dalla gestione della sicurezza di dighe e sbarramenti, che naturalmente, per il suo carattere predittivo, deve svolgersi principalmente nell'ambito della teoria della probabilità. Per quanto non si possa fare a meno di eseguire misure strumentali e indagini sul campo, i dati che emergono da queste fasi vanno trattati attraverso una teoria statistica consolidata per cui è necessario costituire un linguaggio codificato.

Un tipico approccio probabilistico tende a comprendere analisi tipologica, incertezze e dispersione dei dati e via discorrendo. In particolare, le parole chiave legate all'analisi di probabilità dovrebbero essere le seguenti:

- Rischio
- Probabilità di collasso
- Aleatorietà
- Vulnerabilità
- Incertezza
- Data sampling
- Sicurezza
- Modalità di collasso
- Accuratezza
- Danno

5.2 Approccio Deterministico

5.2.1 Descrizione

Originariamente, lo studio della probabilità di collasso delle dighe veniva svolto pressoché interamente mediante simulazioni numeriche dalla struttura. Il metodi più diffuso era quello degli elementi finiti (anche nelle sue varianti, come le differenze finite o gli elementi discreti), successivamente evoluto andando a trattare concetti quali il mesh-free e l'estensione dell'analisi al livello particellare (particle finite element method). Se tutti i metodi sopracitati sono costituiti da passaggi matematici teoricamente replicabili a mano mediante calcolo, s'intende che il numero di processi e la loro durata non è compatibile se non con un software capace di interiorizzare il linguaggio di ciascun metodo ed eseguire le stesse operazioni che potrebbe fare un individuo, ma con velocità consona alle richieste di uno studio che non sia puramente esercizio didattico. Allontanandosi dalla teoria fine a se stessa, si tratta di ricostruire a livello matematico l'interazione fisica tra il corpo diga, il bacino idrico e le fondazioni. A tale scopo si sono dedicati numerosi studiosi, di cui ricordiamo i più significativi con una breve descrizione dei loro risultati:

- Westergaard e Zangar sono pervenuti ad una soluzione approssimata dell'interazione fluido-struttura (definita come FSI, "Fluid-Structure Interation), che trascurava l'apporto del terreno sui cui è realizzata l'opera di invaso
- Chopra ha introdotto semplificazioni sufficienti a introdurre il fattore fondazione (SSI, "Soil-Structure Interaction"

Una volta definite le dinamiche di interazione tra gli elementi, è diventato cruciale affinare la qualità dell'analisi attraverso l'implementazione di algoritmi capaci di cogliere la non-linearità dei materiali coinvolti (in particolar modo all'interfaccia tra gli elementi). Ad esempio, il FEMA ha

elaborato una guida generale, associata unicamente alla dighe in CLS, che evidenzia bene i limiti di applicabilità di ogni metodo[164].

Elemento comune alla maggior parte dei metodi resta l'espressione della distanza dallo stato di collasso attraverso il cosiddetto Fattore di Sicurezza (FS), che è espresso nel seguente modo:

$$FS = \frac{C}{D}$$

Dove:

- C rappresenta la Capacità del sistema, ovvero la sua resistenza intrinseca
- D identifica la Domande del sistema, in altre parole il carico complessivo a cui è sottoposto

La scelta di questi parametri permette un ampio spettro di applicazione e richiede una potenza di calcolo tutto sommato contenuta. Ovviamente, a tale semplicità di fondo si contrappongono alcuni problemi caratteristici, che possono essere risolti andando a rimuovere di volta in volta ipotesi semplificative, con conseguente complicazione del processo:

- I carichi possono essere unicamente verificati in esercizio
- Non si tiene conto delle diverse incertezze legate da una parte alla resistenza, dall'altra alla capacità
- Pur restituendo in output un numero pure che sembrerebbe ideale per eseguire correlazioni tra situazioni diverse, la forte semplificazione nella definizione dei parametri impedisce un confronto efficace
- Non si impone una distinzione tra carichi di natura diversa (ad esempio quelli permanenti da quelli accidentali)
- Si tratta di un'analisi puramente deterministica, in quanto i valori che definiscono i parametri sono imposti una volta per tutte e non vi è spazio per deviazioni statistiche

La formula di FS sopra rappresentata non costituisce naturalmente una relazione matematica in sé, ma permette di raffigurare sinteticamente le forze in gioco. Per ottenere una formulazione più accurata, si può fare riferimento al Metodo dell'Equilibrio Limite (LEM, "Limit Equilibrium Method", Figura 157), tradizionalmente impiegato in presenza di sistemi assimilabili a corpi rigidi. Non tutti gli esperti convengono sul numero e sulla natura dei parametri coinvolti, ma una relazione comunemente accettata dalla Comunità Scientifica è quella elaborata da Pourkamali e Anaraki:

$$FS = f\left(T, W, U, \varphi, c, A, \alpha, FS_{\varphi}, FS_{c}\right)$$

I fattori implicati consentono di tenere conto della maggior parte dei fenomeni che intercorrono in un'analisi di stabilità (Fig.):

- T è lo sforzo di taglio che si registra all'interfaccia tra le varie superfici potenzialmente di collasso
- W è il peso del sistema, che segue la direzione del filo a piombo
- U è la forza di sollevamento, tendenzialmente esercitata dall'acqua (pressione interstiziale, Forza di Archimede, ecc…)
- φ è l'angolo di attrito interno del materiale

[164] Kirchsteiger, "On the use of probabilistic and deterministic methods in risk analysis"

- c è il fattore di coesione associato al piano di scivolamento
- A rappresenta l'estensione della superficie di taglio
- α identifica l'angolo rispetto all'orizzontale che viene assunto dalla superficie di scivolamento
- FS_φ, FS_c sono da interpretare come fattori di sicurezza parziali, relativi rispettivamente all'attrito interno e alla coesione

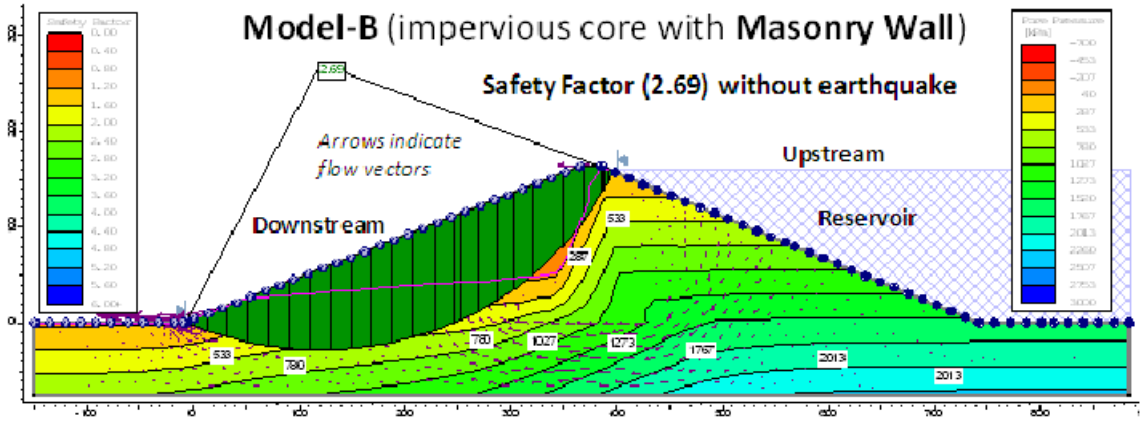


Figura 157 - Esempio di calcolo del Fattore di Sicurezza con metodo agli elementi finiti

Una volta illustrato l'approccio teorico, conviene mostrare un'applicazione pratica di tale relazione all'ambito della sicurezza delle dighe. Vista la necessità di avere a che fare con corpi rigidi o comunque riconducibili a sistemi rigidi, la tipologia strutturale che meglio si adatta a questo metodo senza generare eccessive incertezze è da ricercarsi nelle dighe in cemento armato, che si caratterizzano per la minore deformabilità rispetto a quelle in materiale sciolto (terra o roccia). Si è quindi deciso di fare riferimento al caso studio della diga Shrafud, realizzata in CLS e adibita a funzioni di irrigazione nel Nord-Ovest dell'Iran. Essa è stata oggetto di studio da parte di Farid MiarNaeim e Gholamreza Azizyan, i quali hanno effettivamente provveduto a calcolare le grandezze descritte in precedenza per diverse configurazioni di altezza idrica.

5.2.2 Caso studio: la diga Shrafud allo Stato Limite

Come anticipato al punto precedente, la diga in questione (di altezza pari a 150 metri) svolge funzioni di accumulo e redistribuzione di acqua a scopo agricolo a ridosso del Mar Caspio. Le autorità governative iraniane hanno proposto di aumentare del 50% la superficie di campi irrigata a partire da questo impianto, operazione che esige naturalmente una significativa crescita della capacità di invaso rispetto al progetto iniziale. I due autori hanno quindi provveduto a verificare la stabilità dell'opera allo scivolamento e al ribaltamento mediante un Fattore di Sicurezza dipendente dalle condizioni al contorno.

Le forze prese in considerazioni sono le seguenti (Figura 158):

- Spinta idrostatica
- Spinta idrodinamica

- Azione sismica
- Peso della struttura

Oltre a mettere a confronto altezze di invaso differenti, si è riservato particolare interesse alle condizioni di drenaggio diverse che potrebbero verificarsi nel corso della vita utile dell'opera.

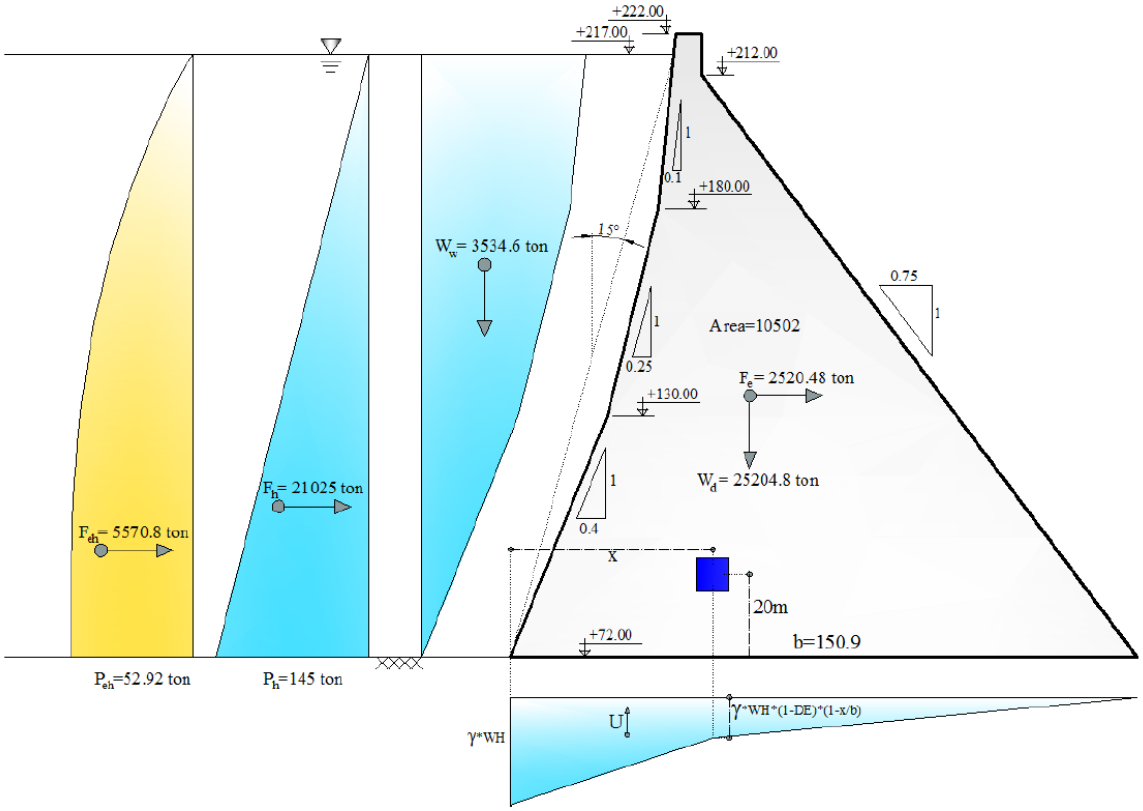


Figura 158 - Distribuzione degli sforzi sulla diga

F_e rappresenta l'entità dell'azione sismica sul corpo diga. A livello pratico la forza che genera questa distribuzione viene calcolata come il prodotto tra un coefficiente sismico α (posto pari a 0,1g con riferimento alla normativa USBR) e il peso della struttura W_d. Si tratta di un valore costante che è applicato lungo un piano orizzontale e ortogonale alla Forza Peso. Per quanto riguarda le azioni sul liquido, oltre al peso (stabilizzante) della massa d'acqua sul paramento interno e alla distribuzione idrostatica, di facile calcolo, si sottolinea la costruzione dell'andamento della Forza Idrodinamica indotta dal terremoto. Per determinarla si passa attraverso la formula che consente di ottenere la pressione idrodinamica, ovvero:

$$\mathrm{P_{eh}} = 0.73 * \frac{90 - \theta}{\theta} * \alpha * \gamma_w * \mathrm{WH}$$

Tale relazione coinvolge l'angolo θ di inclinazione del paramento interno, il coefficiente sismico già illustrato, l'altezza di pelo libero WH e il peso specifico del liquido γ_w . A partire da tale distribuzione di pressioni, crescente in maniera sempre meno pronunciata con la profondità (fino ad assumere valore pressoché costante sul fondo), è possibile determinare la Forza Idrodinamica:

$$F_{eh} = 0.726 * \mathrm{P_{eh}} * \mathrm{WH}$$

E il Momento associato a tale forza, con formulazione analoga. Resta da determinare la forza indotta dalle pressioni interstiziali caratterizzanti le fondazioni dell'opera, che vengono visualizzate dallo studio stesso in diverse configurazioni a seconda dell'efficienza di eventuali dreni deputati a ridurne l'intensità (Figura 159).

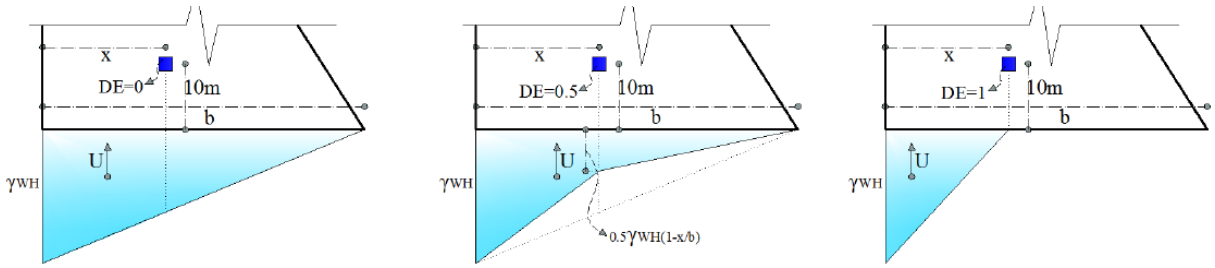


Figura 159 - Configurazioni di drenaggio

Una volta nota la composizione delle forze sul sistema Diga+Bacino+Fondazioni, la forza del Metodo allo Stato Limite risiede proprio nell'immediatezza di calcolo del Fattore di Sicurezza, che può essere determinato, per le condizioni di ribaltamento e scivolamento, secondo le seguenti semplici formule, derivanti da considerazioni di equilibrio di forze e momenti:

$$S_{S-f} = \frac{\sum Resistance\ Forces}{\sum Provocative\ Forces} = \frac{(W_d + W_w - U)\tan\varphi + AC}{F_h + F_{eh} + F_e}$$

$$S_{O-f} = \frac{\sum Resistance\ Moments}{\sum Provocative\ Momets} = \frac{\sum_{i=1}^{4} W_d d_{wd} + W_w * d_{ww}}{F_h * d_{fh} + F_{eh} * d_{feh} + F_e * d_{fe} + U_W * d_{uw}}$$

Nello specifico, la prima relazione permette di risalire al Fattore di Sicurezza allo Scivolamento, un meccanismo che può instaurarsi quando la sommatoria delle forze che spingono il sistema a mettersi in moto lungo il piano di scivolamento supera quella delle forze che, agendo in direzione perpendicolare, ne stabilizzerebbero la configurazione. Nel momento in cui si valuta il ribaltamento, invece, è necessario stabilire un polo di potenziale rotazione del sistema e calcolare il rapporto tra i momenti stabilizzanti e momenti ribaltanti. Ovviamente, non si è di fronte a valori costanti, in quanto la distribuzione, l'entità e la direzione delle forze variabili è direttamente correlata alla capacità di drenaggio alla base e all'altezza dell'acqua nel bacino. Per questo motivo, i due autori hanno elaborato una serie di grafici distinti da livelli idrici significativi (a partire dal massimo accettabile di 145 metri per poi scalare del 25% circa ogni volta), al cui interno imporre una variazione costante dell'efficienza di drenaggio e una variazione puntuale della posizione delle tubazioni, per poi e studiare l'andamento del Fattore di Sicurezza di conseguenza; l'obiettivo è quello di assicurarsi che quest'ultimo si mantenga al di sopra del FS di soglia imposto dalla normativa nazionale (3 per lo scivolamento e 1,5 per il ribaltamento). A titolo di esempio si mostrano i risultati conseguiti per il valore di 30 m di livello idrico e per l'invaso massimo consentito, provvedendo a commentarli (Fig.):

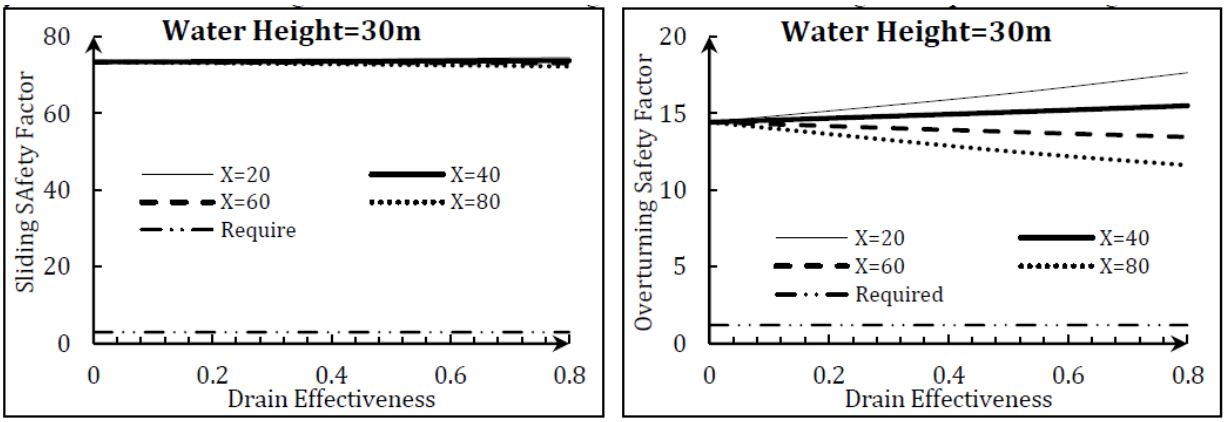


Figura 160 - Andamento del Fattore di Sicurezza per un'altezza idrica di 30 metri

Come prevedibile, in corrispondenza di valori di altezza di pelo libero molto al di sotto di quelli progettuali (si ricorda che la diga prevede un coronamento posto a 150 metri dalla base), il Fattore di Sicurezza in esercizio assume valori considerevoli per quanto riguarda il ribaltamento e elevatissimi in corrispondenza della verifica a scorrimento (Figura 160). Inoltre, è doveroso sottolineare come per quest'ultima l'influenza della distanza del drenaggio dal paramento interno sia pressoché trascurabile, mentre nel caso del ribaltamento si assiste ad un'inclinazione differenziata delle varie curve, pur contenuta nel range di un paio di unità (di Fattore di Sicurezza) massime. La stabilità dell'opera non è comunque minimamente messa in discussione per questa entità di invaso.

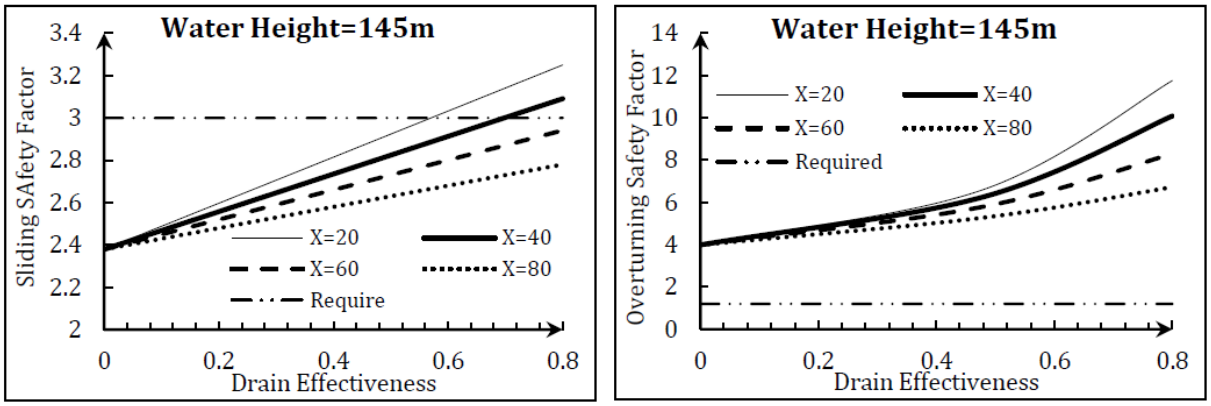


Figura 161 - Andamento del Fattore di Sicurezza per un'altezza idrica di 145 metri

Se si alza l'asticella fino al valore target di 145 metri (Figura 161), si registra un capovolgimento di fronte per quanto riguarda la tipologia di collasso: in questa configurazione, il Fattore di Sicurezza che fotografa la condizione di potenziale scivolamento si installa al di sotto della soglia accettabile per un'efficienza inferiore al 60% e dipende in parte anche dalla vicinanza dei dreni al bacino (addirittura, se si superano i 60 metri di distanza, si registra l'impossibilità di assicurare le condizioni di sicurezza volute). Il Fattore di Sicurezza al ribaltamento, pur trovandosi naturalmente diminuito rispetto al caso precedente, presenta un minimo al valore 4 (quindi molto superiore al limite di 1,5) e tende a crescere proporzionalmente all'efficienza idraulica fino al 50% di questa, per poi assumere una dipendenza quadratica che migliora ultimamente la salvaguardia del sistema dal rischio di crollo. L'apertura delle curve in base al posizionamento dei dreni induce nuovamente piccole ma non trascurabili variazioni del Fattore di Sicurezza.

In conclusione, grazie a questo studio, è stato possibile determinare che anche in condizioni di massimo invaso, la messa in sicurezza della diga di Shrafud richiede semplicemente un'efficienza di smaltimento dell'acqua in fondazione del 60/70% per dreni posizionanti ad una distanza sufficientemente prossima al paramento interno (non più di 30 metri), e che per ogni altra configurazione il Fattore di Sicurezza si mantiene ben al di sopra della soglia. Inoltre, è stato possibile evidenziare la relativa predisposizione allo scivolamento piuttosto che al ribaltamento per carichi idrici notevoli.

5.2.3 Potenzialità e limiti del metodo del Fattore di Sicurezza

L'applicazione al caso studio appena illustrato mostra come, attraverso semplici passaggi matematici che non richiedono nemmeno il supporto di un calcolatore, sia possibile calcolare il rischio di una diga di grandi dimensioni, una volta note le caratteristiche strutturali essenziali. Il metodo dello Stato Limite sembra quindi proporsi come alternativa rapida e dal facile accesso rispetto ai più complessi ragionamenti di natura statistica, che verranno presentati nei prossimi paragrafi. Tuttavia, esso rimane una soluzione applicabile unicamente ad una casistica di strutture circoscritta:

- Soltanto le dighe costruite con materiali compatti e privi di vuoti significativi possono rispettare il criterio di corpo rigido, che consente di trattare l'insieme di elementi come un unico corpo a cui applicare le equazioni di equilibrio a traslazione e rotazione
- Il Fattore di Sicurezza ottenuto va inteso come associato all'opera nel suo complesso, mentre è noto dalla Geotecnica che un sistema presenta in ogni sua parte una diversa condizione tensionale a cui corrisponde una distanza dalla configurazione di collasso specifica. E' quindi possibile che un'eventuale collasso possa manifestarsi prima del previsto in zone che a rigore dovrebbero essere caratterizzate da un FS più critico
- Vista l'estrema variabilità delle forze in gioco e le notevoli approssimazioni accettate, è necessario sovradimensionare la struttura per assicurare un Fattore di Sicurezza molto superiore all'unità (che coinciderebbe con una situazione di incipiente scivolamento o ribaltamento). Dal punto di vista puramente economico, tale scelta induce costi maggiori.

5.3 Metodi di calcolo del Rischio[165]

L'analisi di rischio consiste nel riconoscimento dei rischi che possono coinvolgere un sistema ingegneristico e/o l'ambiente che lo circonda, come ad esempio, limitandosi agli interessi del presente studio, una diga. Il fine di questo tipo di analisi è triplice e può essere così suddiviso:

- **Identificazione del rischio**: restringere il campo degli eventi potenzialmente dannosi a cui il sistema può essere sottoposto nel corso della sua vita utile.
- **Individuazione delle cause**: una volta stabilite le modalità di incidente, risulta necessario ricostruire il percorso dell'evento pericoloso
- **Determinazione del rischio**: esso risponde all'esigenza di quantificare il rischio sotto forma di valori numerici o comunque all'interno di una scala, nell'ottica di favorire un confronto tra sistemi diversi e, quel che più conta, realizzare un'analisi costi-benefici delle misura da

[165] Bowles, «Approaches to estimating individual risk for dam safety tolerable risk evaluation»

intraprendere (ad esempio per valutare se sia più conveniente eseguire un intervento più oneroso oppure uno più economico ma che in proporzione induce una riduzione di rischio maggiormente significativa)

Una distinzione preliminare sulle tipologie di rischio riguarda il fatto che essi si siano già verificati o meno in passato: nel primo caso si è di fronte ad un rischio definito come "Realized Hazard" che può essere indagato semplicemente attraverso l'esperienza; altrimenti lo studio di un "Unrealized Hazard" richiede capacità predittive basate tendenzialmente sulle caratteristiche ambientali del sito. In generale, esistono numerosi metodi di analisi del rischio, di cui si ricordano i più diffusi e comunemente accettati dalla comunità scientifica:

- **Preliminary hazard analysis:** questo tipo di analisi si configura spesso come un modo per abbordare un problema inerente al rischio in maniera semplice e intuitiva. Esordisce con l'identificazione del potenziale rischio, ne stima i danni e sulla base di questi ultimi ipotizza misure di mitigazione. Si presta molto bene nelle fasi preliminari del progetto di un invaso, quando è ancora possibile intervenire attivamente con precauzioni e modifiche sostanziali senza indurre costi troppo elevati che si imporrebbero invece a lavori conclusi
- **Preliminary risk analysis:** come suggerisce il nome, il focus del metodo ricade direttamente sul Rischio inteso come quantificazione degli scenari di perdita (in termini economici o umani); inoltre, si tratta di un approccio di squadra che impone il confronto tra esperti di settore che possano assicurare un'interpretazione adeguata anche in presenza di rischi relativi ad ambiti molto eterogenei tra loro
- **Checklist analysis:** l'analisi si basa su un processo di brainstorming che si pone interrogativi a proposito di eventi potenzialmente dannosi, evidenziandone le criticità e al tempo stesso assicurando precauzioni contro di essi. La metodologia prevede di realizzare una serie di criteri di verifica validi in una determinata configurazione (ad esempio: diga in terra sottoposta a overtopping), dopodiché diventa applicabile a opere strutturali indipendenti e ben distinte.
- **Failure modes and effect analysis:** si basa su ragionamenti induttivi che tentano di sviluppare il processo di incidente a partire dai rischi connessi ad ogni singolo componente del sistema. Nasce come metodo qualitativo, ma le sue risposte possono essere convertite in valori numerici nella sua versione denominata "Failure Modes, effects and critically analysis"
- **Hazard and operability analysis:** nuovamente di natura induttiva, questo metodo si concentra sulle deviazioni del normale decorso strutturale di un'opera che punta ad evitare il rischio di incidente
- **Fault tree analysis (FTA):** si è di fronte ad un metodo che si esplica principalmente per via grafica che esemplifica un processo deduttivo; si ripercorre il percorso logico che, a partire dal verificarsi dell'evento incidentale, risale alle potenziali combinazioni rischiose tra errori umani, danni accidentali e malfunzionamenti.
- **Event tree analysis (ETA):** il percorso esecutivo di questo metodo si configura come diametralmente opposto rispetto al precedente. Si parte da un evento che perturba inizialmente il sistema in quiete (come può essere un sisma per una diga, a cui non segue immediatamente il crollo, bensì una serie di altre conseguenze concatenate) e si cerca di individuare il path logico che conduce al collasso, calcolando la probabilità di occorrenza ad ogni ramo

- **Relative Ranking:** si basa su indici numerici per eseguire raffronti tra varie alternative, riferite però unicamente all'ambito portuale e della navigazione
- **Coarse risk analysis:** sempre relativamente al trasporto marittimo e al rischio nei dintorni dei porti, si realizza una successione di operazioni/valutazioni tipiche del processo in questione; a seguire si ricercano eventuali deviazioni che potrebbero costituire l'avvisaglia di un incidente
- **Pareto Analysis:** si tratta di una tecnica di gestione prioritaria dell'analisi di rischio, basata unicamente su dati storici attraverso la regola "80-20", secondo cui l'80% degli effetti deriva dal 20% di cause.
- **Root Cause Analysis:** tale metodo punta a risalire, come lascia intendere il nome, alla radice delle cause scatenanti di un determinato evento catastrofico, attraverso una dissezione del problema in tutte le sue componenti non ulteriormente suddivisibili (singoli equipaggiamenti, errore umano localizzato, ecc…); al termine dell'analisi, l'obiettivo resta quello di indicare dei comportamenti e delle precauzioni alternative, sempre molto precisi e circoscritti, al fine di ridurre le possibilità di incidente
- **Change Analysis;** essa si focalizza su tutte quelle situazioni in cui intervengono cambiamenti radicali (ad esempio: variazione destinazione d'uso di un'opera), tali per cui determinati incidenti diventano improvvisamente più probabili.
- **Common Cause Failure Analysis:** si tratta di un approccio specializzato nella disamina di quegli eventi disastrosi diversi che però condividono le stesse cause originarie, in modo tale da ottimizzare la messa in sicurezza
- **Human Error Analysis:** spesso realizzata mediante checklist, come fa intuire il nome si concentra sull'impatto delle scelte umane sul rischio

La classificazione appena indicata si dimostra piuttosto esaustiva nell'ambito dell'analisi di rischio, ma prevede metodi di analisi difficilmente replicabili all'interno di questo studio, nonché di scarso interesse per l'ambito di indagine, ovvero quello degli incidenti connessi alle dighe e agli sbarramenti. Si è quindi provveduto ad individuare le tipologie più adatte a rispondere alle esigenze manifestate all'interno dell'introduzione, ovvero quelle di risalire a specifiche misure strutturali e non per mitigare il rischio idraulico; oltre a riportarle di seguito per completezza, si è associata ad ogni voce una breve introduzione inerente a come il metodo in questione verrà affrontato sulla base dei dati a disposizione:

1. **Failure Modes**: verranno indagati i principali fenomeni dannosi che colpiscono le opere di regimazione idraulica, come l'Overtopping, lo Sliding, i terremoti e gli attentati terroristici. A seguito di una descrizione tecnico-scientifica delle modalità con cui tali fenomeni si realizzano, si provvederà ad illustrare alcuni casi studio relativi a quel tipo di incidenti (sia catastrofici che non), al fine di approfondire su situazioni reali la teoria del processo di incidente, oltre a verificare le conseguenze effettive e accennare ad alcune misure di contenimento del rischio post-incidente
2. **Preliminary Hazard Analysis**: con l'aiuto di un database creato autonomamente a partire dai record di incidenti disponibili in letteratura e online (la procedura di costruzione della banca dati sarà oggetto di un paragrafo dettagliato), verrà svolta un'analisi statistica comparata sulla distribuzione degli incidenti all'interno della popolazione mondiale di dighe. Si verificheranno correlazioni interne al database stesso (ad esempio la predisposizione di un determinata tipologia strutturale ad un dato fenomeno pericoloso) e si metterà in relazione tale database di incidenti a quello

delle grandi e piccole dighe, per verificare l'attendibilità del campione e individuare le combinazioni ingegneristiche più sensibili al rischio

3. **Event Tree Analysis**: sulla base delle informazioni raccolte sia a livello teorico che attraverso lo studio del database creato, sarà possibile esplicitare il percorso ("path") di incidente connesso a tutta una serie di fenomeni ben circoscritti. A partire dalla constatazione del verificarsi o meno di un determinato fenomeno (come potrebbe essere "Piping of Dam Body", ovvero filtrazione attraverso il corpo diga), verrà prodotto un albero di eventi successivi e concatenati tra loro, caratterizzati ad ogni passaggio da più possibilità di scelta identificate (nel caso di calcolo effettivo della probabilità di collasso) rispettivamente da un'occorrenza relativa. Verrà descritta nel dettaglio la costruzione di ogni albero di evento, con il supporto di esempi reali contenuti nel database. Sarà inoltre chiarito il percorso di razionalizzazione delle cause scatenanti in una classificazione sintetica che permetta appunto di studiare sotto la stessa luce incidenti distinti tra loro, ma caratterizzati da un processo di incidente analogo. Infine, nel caso in cui si verificasse la fattibilità dal punto di vista della disponibilità di dati, si determinerà la probabilità di collasso almeno per una tipologia di fenomeno, sia attraverso analisi statistica a partire dalla banca dati, sia tramite i Fuzzy Numbers e la valutazione degli esperti (metodi illustrati a livello teorico all'interno del capitolo stesso).

6 FAILURE MODES

6.1 Overtopping

6.1.1 Considerazioni generali

Con il termine "Overtopping" si è soliti definire il generico fenomeno per il quale il livello all'interno del bacino supera la capacità massima dello stesso, o in alternativa sorpassa l'altezza di coronamento della diga. Le cause scatenanti sono da ricercare nell'inadeguatezza delle potenzialità di smaltimento associate allo sfioratore superficiale ("Insufficient spillway capacity") oppure a piene di entità decisamente superiore ai valori di progetto dell'opera idraulica ("Extreme flood"). Ad esse si aggiunge l'eventualità di movimenti differenziali in corrispondenza della cresta della diga (punto sommitale dello sfioratore), ovvero "Settlement of the dam crest"[166]. In generale, tali condizioni si verificano nel momento in cui si assiste ad un aumento repentino del livello idrico in mancanza di allerta; ciò avviene naturalmente durante periodi di pioggia intensa, tuttavia risulta ancora più catastrofico quando dipendente da fenomeni impulsivi quali flashfloods, frane all'interno del bacino (è il caso tristemente noto del Vajont) e addirittura collasso di una o più dighe a monte. L'Overtopping, che in prima analisi risulta responsabile di un terzo degli insuccessi idraulici a livello mondiale[167], può compromettere rapidamente l'integrità strutturale della diga andando a erodere la parete esterna della stessa; di conseguenza, si può verificare lo sganciamento della struttura idraulica rispetto alle sponde del bacino (Figura 162) .

Figura 162 - Liberazione incontrollata del bacino in seguito ad overtopping

In base alle modalità di collasso, si può comprendere immediatamente come siano le dighe in terra a risultare maggiormente esposte a tale rischio, al punto tale da costituire, insieme a quello legato all'erosione interna, il 73% degli incidenti totali[8] . La predisposizione delle dighe in terra a subire erosione dipende strettamente da:

- Qualità del materiale impiegato in fase di costruzione
- Altezza e durata del fenomeno idrico
- Densità della vegetazione di ricoprimento

[166] Huzjak, «SETTLEMENT OF EMBANKMENT DAMS - DON'T FORGET ABOUT THE BEDROCK».
[167] John E. Costa "FLOODS FROM DAM FAILURES" (1985)

In particolare, quest'ultimo fattore dovrebbe essere integrato direttamente in fase progettuale[168], data la notevole capacità di una coltre vegetale di contenere o perlomeno rallentare i fenomeni erosivi. Infatti, se non sempre è possibile impedire l'overtopping, uno strato vegetativo di spessore e caratterische adeguati potrebbe quantomeno consentire di ritardare il collasso della struttura di un tempo sufficiente a completare le procedure di evacuazione. Tale accorgimento richiede tuttavia manutenzione costante, soprattutto a livello di irrigazione, a meno di trovarsi in ambienti caratterizzati da un clima umido che assicuri uno sviluppo omogeneo del manto erboso. A livello operativo, la vegetazione agisce in due direzioni: da un lato consolida il terreno attraverso lo sviluppo di una rete interconnessa di radici; dall'altro, diminuisce la velocità di aumento del pelo libero grazie all'assorbimento di ingenti quantità di acqua[169]. A sostegno dell'azione naturale esercitata dalla coltre erbosa, nell'ambito dell'Ingegneria naturalistica si stanno diffondendo sistemi di rinforzo sotto forma di materassi sintetici ("turf reinforcement", vedasi Figura 163) nell'ottica di costituire un supporto di crescita alla vegetazione e di incentivare al tempo stesso il potere di ritenuta strutturale[170].

Figura 163 - Turf Reinforcement sul paramento di valle di una diga in terra

E' di opinione comune che, al contrario, le dighe realizzate in calcestruzzo possano offrire resistenza maggiore ai fenomeni di overtopping, a maggior ragione considerando che esse richiedono tradizionalmente una fondazione in roccia compatta; l'insieme sembra quindi costituire una barriera efficace contro l'erosione. Non va però trascurata l'eventualità di fratture diffuse in tutto il corpo frana, che rischierebbero di costituire un percorso preferenziale per l'acqua.

6.1.2 Il processo erosivo

In caso di overtopping di un diga in terra, l'erosione sembra concentrarsi sulla sponda di valle, a causa della maggiore velocità registrata, e in corrispondenza di particolari ostacoli (quali massi, tronchi d'albero, sporgenze artificiali) che impongono una deviazione del flusso idrico. La turbolenza può inoltre essere alimentata dalla variazione di materiale di ricoprimento superficiale o da un cambiamento di scabrezza[171]. Come accennato in precedenza, anche le zone a scarsa vegetazione costituiscono punti di sviluppo privilegiato dell'erosione. Si assiste di conseguenza alla

[168] Tom Hepler , Bill Fiedler , Tracy Vermeyen , Bob Dewey , Tony Wahl "OVERTOPPING PROTECTION FOR DAMS – A TECHNICAL MANUAL OVERVIEW"
[169] Temple, Irwin (2006)
[170] Hewlett et al. (1987)
[171] Bureau of Reclamation – U.S. Department of the Interior "Erosion of Rock and Soil"

formazione di una serie di “headcut” di dimensioni contenute, che tendono a progredire dalla sponda a valle fino ad aprirsi anche all’interno, fino a originare una breccia in corrispondenza della cresta della diga (Figura 164). Un eventuale ricoprimento in cemento della sommità potrebbe contribuire a rallentare il fenomeno, senza tuttavia impedirne la nascita e lo sviluppo; anzi, non è escluso che tale accorgimento possa degenerare in un distacco della copertura stessa, che comporterebbe rischi perfino maggiori.

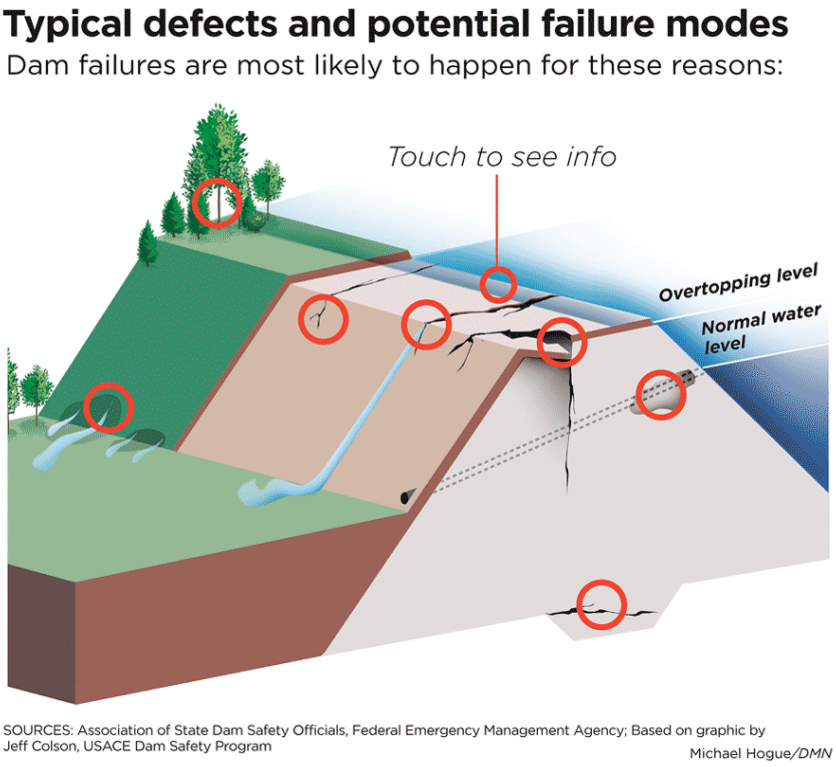


Figura 164 - L'Overtopping e fenomeni erosivi accessori

Per quanto riguarda le dighe in calcestruzzo, il punto debole è costituito dalle fondazioni in roccia, che richiedono un’analisi geologica approfondita[12]. Tale studio andrebbe esteso ai principali orizzontamenti al di sotto dell’opera, in modo tale da individuare con precisione la profondità potenziale di erosione. Altro elemento a rischio è rappresentato dai parapetti normalmente deputati al contenimento delle onde di superficie, i quali, in caso di erosione localizzata e conseguente crollo, esporrebbero il resto della struttura ad un carico idraulico ancora maggiore.

6.1.3 I meccanismi di Overtopping

Come anticipato nell’introduzione, l’Overtopping si realizza nel momento in cui la superficie libera (in quiete o in moto) del bacino supera il limite inferiore dello sbarramento. Nel momento in cui si tratta di un innalzamento regolare, dovuto ad esempio ad una piena, il monitoraggio della situazione e la conseguenze allerta risultano più semplici; diverso il discorso per l’”overtopping by waves”, ovvero lo scavalcamento dello sfioratore ad opera di singole onde, mentre invece il livello medio della superficie si mantiene poco al di sotto della soglia di pericolo. Trattandosi di una condizione fortemente legata al vento, per essere tenuta sotto controllo essa richiede un’analisi che tenga in conto anche della velocità e direzione delle correnti aeree, della pressione atmosferica e della

ripidezza delle sponde della diga[172]. Naturalmente, interesse particolare va riservato allo studio statistico della probabilità di occorrenza di piene caratterizzate da una determinata portata di colmo, sufficiente a generare problemi di Overtopping. Di norma, tale passaggio si esplica attraverso un modello fisico-matematico dell'invaso[173] a cui associare, mediante un software agli elementi finiti, idrogrammi reali o simulati; questo nell'ottica di calcolare la variazione di livello idrico. Non è tuttavia possibile trascurare altri fattori determinanti nella stima dell'impatto di una piena sull'opera idraulica, principalmente dipendenti dall'efficienza di smaltimento della stessa: le caratteristiche e l'efficienza dello sfioratore superficiale influiscono profondamente sulla frequenza di accadimento di fenomeni di overtopping, come anche la pulizia dai detriti potenzialmente in grado di ostruire le vanne sommerse o lo sfioratore medesimo.

In genere, la capacità di uno sfioratore è determinata in base al cosiddetto Inflow Design Flood (IDF), che è definito come:

"The flood flow above which the incremental increase in water surface elevation due to failure of a dam or other water impounding structure is no longer considered to present an unacceptable threat to downstream life or property. The IDF of a dam or other water impounding structure flood hydrograph is used in the design of a dam and its appurtenant works particularly for sizing the spillway and outlet works, and for determining maximum height of a dam, freeboard, and temporary storage requirements."[174]

In altre parole, tale indice sancisce il limite di flusso di piena oltre il quale non si ritiene più rischioso per gli individui e le proprietà a valle dell'opera un aumento del livello idrico; esso permette di dimensionare adeguatamente l'altezza e altri parametri strutturali della diga e delle opere di regimazione accessorie.
In corrispondenza di impianti deputati anche alla trasformazione del flusso idrico in energia idroelettrica, occorre prestare ulteriore attenzione alla capacità o meno delle turbine di risultare "trasparenti" alla corrente di piena; in caso negativo, esse potrebbero favorire fenomeni di occlusione e indurre modalità di collasso alternative (che si sommerebbero ai rischi di overtopping)

Un altro rischio riguarda l'occlusione parziale dello sfioratore, che può aumentare significativamente il numero di piene che mettono in pericolo l'opera idraulica. Nel corso di precipitazioni anche modeste, non è escluso che detriti (rami, massi, rifiuti) possano essere trasportati dalla corrente e smaltiti a fatica dallo sfioratore, finendo per concentrarsi in prossimità di esso. Una soluzione tradizionalmente diffusa, soprattutto in ambito nordamericano, risulta essere quella di fare ricorso ai cosiddetti "log booms" (Figura 165), ovvero una barriere artificiale capace di raccogliere tronchi e altro materiale galleggiante a monte dell'invaso, limitandone il deposito in prossimità dello sfioratore[175]

[172] A.J. Yarde, L.S. Banyard, N.W.H. Allspo "Reservoir dams: wave conditions, wave overtopping and slab protection"
[173] Lempérière, «Dams and Floods».
[174] FEMA, «Guidelines on Acceptable Flood Capacity for Water Dams July 2017».
[175] U.S. Department of the Interior, "Reservoir Debris Management"

Figura 165 - Log boom a monte di un invaso a rischio intasamento

Si stima che tali barriere flottanti debbano essere posizionate ad una distanza non inferiore ai 15 metri (50 piedi) dallo sfioratore, per assicurare un'efficienza sufficiente e soprattutto scongiurare pericolosi fenomeni di interazione[176].

Al netto della predisposizione dell'opera idraulica a limitare gli effetti di una piena, la discriminante maggiore resta il tempo del fenomeno e l'altezza di sommersione. Per quanto un rivestimento in cemento e l'impiego di materiale più duttili possa contenere i rischi di crollo, il meccanismo di incidente inizia a interessare quasi sempre il versante a valle, originando per erosione una serie di gradini a partire dal piede della diga, i quali progressivamente migrano verso il coronamento fino a indurre il collasso della parte sommitale (Figura 166). La liberazione di un ingente volume d'acqua diventa infine inevitabile[177]

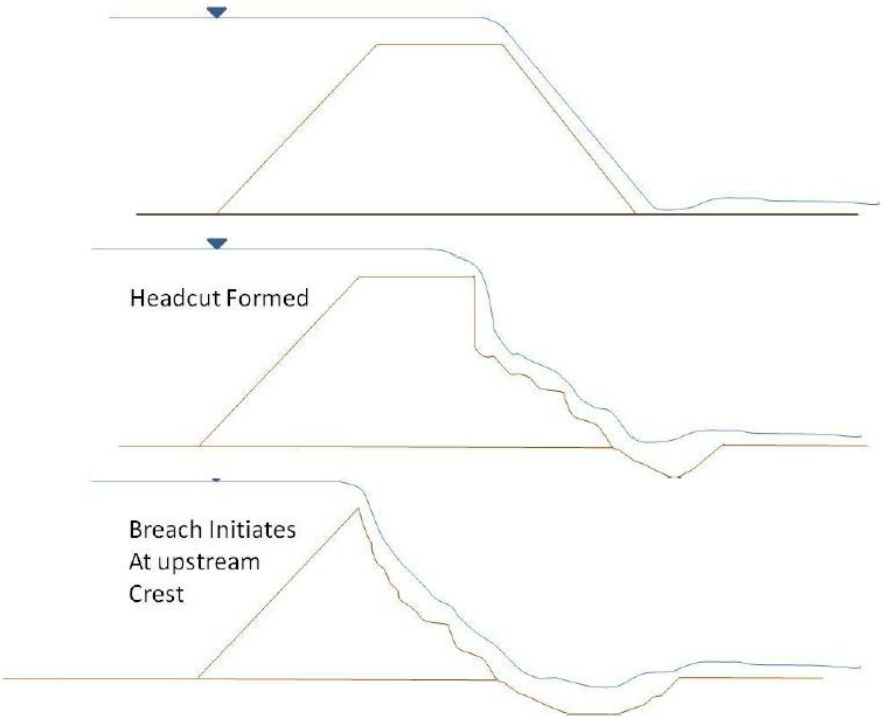


Figura 166 - Sviluppo del fenomeno erosivo

[176] Federal Highway Administration (2005)
[177] Wahl (1998)

Risulta pertanto evidente come, nell'ambito delle dighe in terra sottoposte al rischio di overtopping, le opere di mitigazione dovrebbero concentrarsi non tanto sulla zona dello sfioratore, quanto piuttosto garantire un'adeguata impermeabilizzazione delle fondazioni

6.1.4 I parametri da monitorare

Al fine di sviluppare un'analisi di sicurezza di una diga nei confronti dell'Overtopping, i fattori da prendere in considerazione sono i seguenti[178]:

- Profondità dell'overtopping (ovvero altezza di superamento dello sfioratore)
- Durata dell'overtopping
- Presenza di parapetti suscettibili di ribaltamento o crollo
- Predisposizione dei materiali sul versante a valle nei confronti di fenomeni erosivi

6.1.5 Caso studio: South Fork Dam

Nome della diga: South Fork Dam
Localizzazione: USA, Pennsylvania
Tipologia: Earth Dam
Fenomeno: Overtopping
Data dell'evento: 31 maggio 1889
Data di costruzione: 1881 (data inizio dei lavori, ricostruzione iniziata nel 1879 dopo il crollo del 1862)
Descrizione strutturale: la diga South Fork Dam (anche nota come Johnstown Dam) raggiungeva un'altezza, dopo la ricostruzione completa eseguita nel biennio 1879-1881, di circa 22 metri se si considera la distanza massima tra la fondazione e il punto sommitale della cresta (Figura 167). Il materiale scelto per la sua edificazione fu lo stesso di quella precedentemente crollata, ovvero terra compattata; gli accorgimenti maggiori che la differenziavano dal suo predecessore riguardavano invece l'abbassamento di circa 70 cm della cresta, l'aggiunta di un ponte di legno al di sopra del canale di smaltimento e ostacoli che impedissero ai pesci (si trattava di un bacino con funzioni anche di pesca) di lasciare l'invaso.

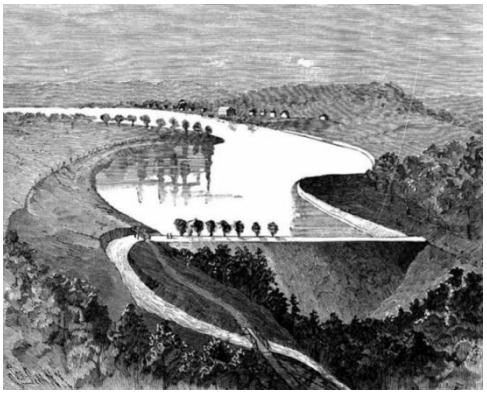


Figura 167 - Ricostruzione della South Fork Dam prima del disastro

[178] Hanson et al. 2011

Dinamica dell'evento: la diga andò incontro ad un crollo catastrofico (Figura 168) a seguito di una piena inattesa (al punto tale da entrare nell'immaginario collettivo con il nome "Johnstown Flood"). Si registrarono bene 2200 vittime

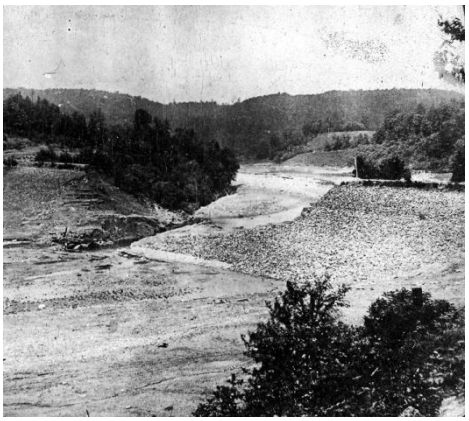


Figura 168 - South Fork Dam subito dopo il crollo per Overtopping

Cause scatenanti: lo studio dell'incidente portò all'individuazione di numerosi fattori di criticità, in particolare:

- L'abbassamento della diga ridusse la capacità di invaso e inficiò le potenzialità di smaltimento dell'acqua superflua attraverso lo sfioratore superficiale
- La riduzione di sezione imposta dalle pile del ponte in legno, unita alla grande quantità di detriti trasportati dalla piena, contribuirono a intasare lo sfioratore
- Le vibrazioni connesse ai lavori di costruzione portarono ad un ulteriore abbassamento della cresta della diga (anche se nell'ordine di qualche cm soltanto)

6.1.6 Caso studio: Sella Zerbino Dam

Nome della diga: Sella Zerbino Dam
Localizzazione: Italia, Piemonte
Tipologia: Concrete Gravity Dam
Fenomeno: Overtopping
Data dell'evento: 13 agosto 1935
Data di costruzione: 1925
Descrizione strutturale: la diga di Sella Zerbino fa parte di un sistema binario di invasi completati pressoché in contemporanea nel 1925, nell'ottica di creare un bacino di accumulo per l'irrigazione della zona normalmente bagnata dal fiume Orba. Il progetto originario in realtà prevedeva unicamente la diga principale, mentre quella secondaria venne implementata in fretta e furia per far fronte a maggiori esigenza di volume idrico, in mancanza di approfondite analisi geologiche. Queste ultime avrebbero infatti rivelato formazioni sconnesse e fortemente frammentate di roccia scistosa. Le due dighe misuravano, rispettivamente, 47 e 14 metri di altezza, entrambe realizzate in cemento armato (quella principale secondo una tipologia ad arco, l'altra a semplice gravità).

Dinamica dell'evento: nell'area si registrò una piena con Tempo di Ritorno intorno ai 1000 anni, di molto superiore a quella di progetto (363 mm in 8 ore di precipitazione)
Cause scatenanti: la diga secondaria aveva già dimostrato problemi di tenuta nel corso del primo riempimento, manifestati nello specifico da una perdita evidente sul paramento di valle. Si verificò quindi un fenomeno di overtopping che portò alla sommersione per una profondità di 2 metri sopra il coronamento; il carico idrico si rivelò eccessivo per le scarse capacità strutturali dell'invaso, il quale crollò di schianto comportando la morte di un centinaio di persone (Figura 169).

Figura 169 - La diga di Sella Zerbino appena prima del crollo

6.1.7 Caso studio: Taum Sauk Dam

Nome della diga: Taum Sauk Dam
Localizzazione: USA, Missouri
Tipologia: Concrete Gravity Dam
Fenomeno: Overtopping
Data dell'evento: 14 dicembre 2005
Data di costruzione: 1963
Descrizione strutturale: la costruzione della diga di Taum Sauk si completò nel giro di un paio di anni a partire dal 1960, per rispondere alle esigenze energetiche in corrispondenza dei picchi di consumo dalla Contea di Reynold. Il complesso si componeva di due bacini, di cui quello di monte eseguito in roccia e quello di valle a gravità; a questi due elementi si aggiungeva la centrale idroelettrica e un tunnel in cemento armato della lunghezza di circa 2,5 chilometri. Le criticità maggiori interessarono l'invaso superiore, caratterizzato da un'altezza di 27,4 metri al coronamento superiore, a cui andavano aggiunti circa 3 metri di parapetto deputato a contenere le onde di invaso generate dal vento. In mancanza di uno sfioratore vero e proprio, questo bacino venne dotato di due attuatori elettrici capaci di interrompere il flusso d'acqua all'interno dello stesso nel caso il livello del pelo libero raggiungesse un'entità ritenuta pericolosa; tale accorgimento consentì all'impianto di diventare il primo esempio al mondo di controllo remoto indipendente da qualsiasi controllo diretto in loco.
Dinamica dell'evento: il 14 dicembre del 2005, a margine di uno dei tradizionali cicli di pompaggio, il bacino superiore crollò in modo catastrofico lasciando una breccia di 200 metri di larghezza (Figura 170) da cui si liberarono alcuni milioni di metri cubi di acqua che invasero il Black River; sebbene questa massa venne contenuta senza problemi dal bacino di valle, il flusso riuscì a devastare il Parco Nazionale Johnson, portandosi via le abitazioni dei custodi e degli

operatori del sito, pur senza causare vittime. Si contò comunque un miliardo di dollari di danni stimati.

Figura 170 - La breccia aperta dall'Overtopping della Taum Sauk Dam

Cause scatenanti:

Uno degli elementi che risultarono successivamente predisponenti al disastro è da ricercarsi in una geomembrana installata nel 2004 (quindi un anno prima dell'incidente) per far fronte alle piccole perdite attraverso il ricoprimento di cemento proiettato sul paramento interno; questo in particolar modo in corrispondenza delle sezioni sottoposte a spostamenti differenziali accumulati durante il quasi mezzo secolo di esercizio. Tale membrana era collegata a sensori di pressione incaricati di arrestare il pompaggio in condizioni critiche. E' inoltre curioso sottolineare che le prime avvisaglie si ebbero in concomitanza con alcuni sopralluoghi volti a certificare un premio per l'innovazione attribuito dall'Istituto per l'Ingegneria Elettrica e Elettronica; venne individuato il superamento del coronamento in alcuni punti, presso cui si realizzavano quello che gli esperti definivano "piccole Cascate del Niagara". Si provvide immediatamente a disabilitare il pompaggio e a cercare di risalire all'origine di questo inatteso overflow: buona parte dei circuiti a cui spettava il controllo del livello idrico avevano perso aderenza con il paramento interno, finendo per comunicare un'altezza di pelo libero decisamente inferiore a quella reale. L'indirizzo di azione fu correttamente quello di introdurre precauzioni in attesa del ripristino del sistema, in particolare andando a riprogrammare il livello atteso dell'acqua nel bacino e introducendo le cosiddette sonde "Warrick" (Figura 171), strumenti che rilevano in autonomia l'innalzamento attraverso misure dielettriche puntuali:

Figura 171 - Sonda warrick per misure puntuali

L’errore risedette nell’aver posizionato tali sonde ad un’altezza superiore al punto più basso del parapetto, dove si verificò una condizione di debolezza strutturale in piena notte, con conseguente perdita idrica localizzato e formazione di un percorso erosivo preferenziale. Si realizzò quindi l’erosione progressive sul paramento esterno appena al di sotto del parapetto, fino alla formazione improvvisa di una breccia di ampie dimensioni e inevitabile onda di piena.

Misure intraprese: nell’impossibilità di ripristinare l’invaso, venne deciso di ricostruire interamente la diga secondo nuovi standard molto restrittivi di sicurezza. Le operazioni si protrassero dal 2007 e dal 2010 con l’impiego di calcestruzzo ad alta resistenza e sistemi di allerta calibrati con cura (Figura 172).

Figura 172 - Ricostruzione della diga Taum Sauk dopo l'incidente

6.2 Earthquake

6.2.1 Introduzione

I terremoti sono sempre stati oggetto di interesse particolare nell'ambito del progetto delle grandi dighe (ovvero di altezza superiore ai 15 metri). L'obiettivo di fondo dell'Ingegneria Sismica, anche in questo caso, resta quello di minimizzare il rischio di collasso, pur naturalmente accettando deformazioni e fessurazioni non catastrofiche all'interno dell'opera. Un esempio eclatante è rappresentato dal sisma di Magnitudo 8 della scala Richter che ha colpito il distretto di Wenchuan[179], in cui più di 1800 opere idrauliche di sbarramento hanno subito danneggiamenti senza però registrare alcun caso di crollo (Figura 173).

Figura 173 - Gli effetti del sisma di Wenchuan sugli edifici prossimi al sito della diga, rimasta invece in piedi

6.2.2 I parametri da monitorare

La progettazione delle dighe in territorio sismico si basa su alcune considerazioni di carattere tecnico-statistico utili a razionalizzare l'entità delle forze in gioco e ad operare dei confronti tra opere temporalmente e geograficamente distanti. Da ciò consegue la necessità di stabilire una gerarchia di eventi sismici secondo criteri chiari e condivisi. Sono quindi previsti tre fattori che identificano ciascuno un terremoto che potrebbe potenzialmente verificarsi nell'area in esame e avente determinate caratteristiche di intensità e probabilità di occorrenza: MCE, MDE (o SEE) e OBE[180].

- *"The MCE is the largest earthquake magnitude that could occur along a recognized fault or within a particular seismotectonic province or source area under the current tectonic framework. The loading resulting from the MCE can and often is exceeded for Probabilistic Methods for high return period faults close in, such as the San Andreas Fault in California"* Il "Maximum Credible Earthquake" dipende unicamente dalla condizione sismogenica del territorio oggetto di studio , ovvero dalla sua predisposizione a generare eventi sismici di determinata entità, sulla base di considerazioni legate alla tettonica delle placche, ai movimenti di subsidenza, alla vicinanza di faglie attive o complessi vulcanici e altri.

[179] Xu et al., «Landslide Dams Triggered by the Wenchuan Earthquake, Sichuan Province, South West China».
[180] «Federal Guidelines for Dam Safety, Earthquake Analysis.pdf».

- *"The MDE or SEE is the earthquake that produces the maximum level of ground motion for which a structure is to be designed or evaluated. The MDE or SEE may be set equal to the MCE or to a design earthquake less than the MCE, depending on the circumstances"*
  In questo caso, si prende in considerazione l'opera coinvolta nella valutazione sismica piuttosto che le caratteristiche della zona, fissando il limite di intensità del terremoto al massimo livello per cui la diga vuole essere progettata (Maximum Design Earthquake) oppure valutata (Safety Evaluation Earthquake). La quantificazione di tali definizioni passa necessariamente attraverso la classificazione del rischio potenziale della diga[181], il tempo stimato di ripristino dell'impianto e la funzione svolta dallo sbarramento. In particolare, quest'ultimo valore distingue le dighe in base all'importanza del loro apporto per la sopravvivenza della comunità umana da essa dipendente: è evidente come un bacino a carattere ricreativo, quale ad esempio una riserva di pesca, rappresenti un elemento meno strategico di un impianto di produzione energetica oppure una struttura di contenimento delle piene. Come anticipato nell'introduzione, il design antisismico che discende dal valore così individuato mira a evitare il fenomeno del rilascio incontrollato del bacino che si realizzerebbe in seguito ad un crollo, ma non impedisce la nascita di debolezze strutturali localizzate. Discorso diverso nel caso in cui si abbia a che fare con un riserva d'acqua ritenuta critica per le esigenze della zona, che impone ulteriori misure di sicurezze per limitare le perdite idriche al di sotto di una soglia ripristinabile in un tempo accettabile.

- *"The OBE is an earthquake that produces ground motions at the site that can reasonably be expected to occur within the service life of the project. The associated performance requirement is that the project function with little or no damage, and without interruption of function. The purpose of the OBE is to protect against economic losses from damage or loss of service. Therefore, the return period for the OBE may be based on"*
  Con il termine OBE (Operating Base Earthquake) si è soliti contraddistinguere un sisma meno intenso rispetto a quelli precedenti, al punto tale da minimizzare qualsiasi rischio di danno e, soprattutto, impedire l'arresto delle funzioni dell'invaso; s'intende che quest'ultimo vada progettato in modo che, durante l'intero corso di vita dell'opera, esso sia normalmente sottoposto a terremoti di questa intensità senza presentare danneggiamenti significativi.

Nell'ottica di quantificare approssimativamente tali fattori, si sappia che il design antisismico delle opere di sbarramento dovrebbe raggiungere uno standard tale da salvaguardare l'opera per un periodo temporale di 10 000 anni, oppure, in termini più comprensibili, sufficiente a assicurare la probabilità di superamento massima pari all'1% su 100 anni. Anche per le strutture civili quali abitazioni o ponti si applicano ragionamenti simili; la differenza principale risiede tuttavia nella diversa distribuzione dei carichi che intercorre tra questi ultimi e le dighe in esercizio (Figura 174). E' evidente come i carichi verticali risultino dominanti all'interno di una struttura adibita al passaggio di veicoli oppure ad ospitare ambienti destinati ad individui e/o macchinari industriali. Al contrario, il carico idrico delle dighe si esplica pressoché totalmente in direzione ortogonale alla parete interna dello sbarramento, il quale, pur non costituendo sempre una barriera perfettamente verticale rispetto al terreno, presenta solitamente pendenze contenute.

[181]FEMA (1998)

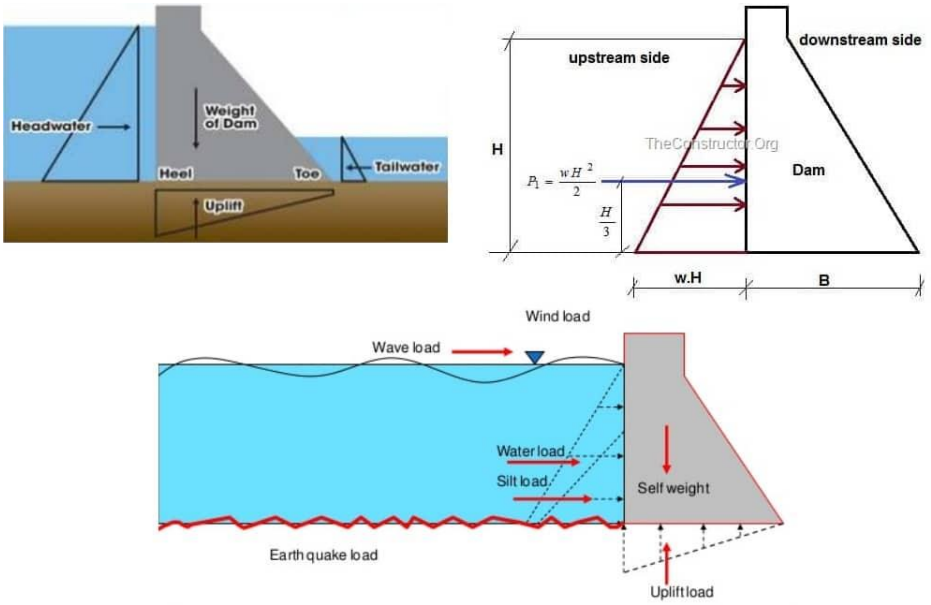


Figura 174 - La distribuzione di forze sul paramento di valle in caso di terremoto

Le dighe si dimostrano quindi già progettate per assorbire le azioni orizzontali che invece tendono a mettere in crisi gli altri edifici. Da questa considerazione discende quindi la bassissima probabilità di collasso associata ad una grande diga (ovvero 1 su 10000, vedasi sopra), che invece non trova riscontro per le strutture normalmente trattate in ambito sismico, per cui il tempo di ritorno di un sisma potenzialmente catastrofico non supera i 475 anni (ovvero 10% di probabilità di superamento nella vita media dell'opera pari a 50 anni)[182]. Inoltre, il design antisismico è stato impiegato nell'ambito della progettazione delle dighe sin dagli anni '30, seppur con metodi oggi ritenuti superati. La progettazione anti-sismica di dighe e sbarramenti viene aggiornata periodicamente da ICOLD attraverso la pubblicazione di bollettini, frutto di un complesso lavoro di sintesi sullo stato dell'arte.

6.2.3 I rischi connessi alla sismicità

In presenza di un bacino sottoposto ad azione sismica, i rischi riguardano diversi ambiti, non soltanto quello strutturale. In particolare si evidenziano (Figura 175):

- Lo scuotimento del terreno induce distorsione e vibrazioni in tutto il sistema della diga, comprensivo di condotte forzate e equipaggiamenti meccanici e elettrici
- Allo stesso modo, le fondazioni possono andare incontro a fratture profonde con conseguenti deformazioni del corpo diga
- Lo spostamento del terreno sul fondo del bacino conserva la capacità di generare onde di superficie e versamenti
- Frane connesse al sisma possono danneggiare le vanne, gli sfioratori, le linee e i trasformatori elettrici, nonché gli edifici operativi

[182] Fasan et al., «Perché una probabilità di superamento del 10% in 50 anni? Un nuovo approccio alla progettazione sismica».

- Non è da escludere il rischio di overtopping, sia a valle dell'opera, sia all'interno delle aree deputate alla produzione di energia (in caso di impianti idroelettrici) o ai processi industriali (per bacini siderurgici, ad esempio), con conseguente danneggiamento diffuso dell'attrezzatura.
- Il terreno, soprattutto se di carattere non coesivo, può andare incontro a liquefazione con movimenti differenziali dell'opera.
- Spostamento in controfase delle spalle della diga, con conseguente rischio di crollo

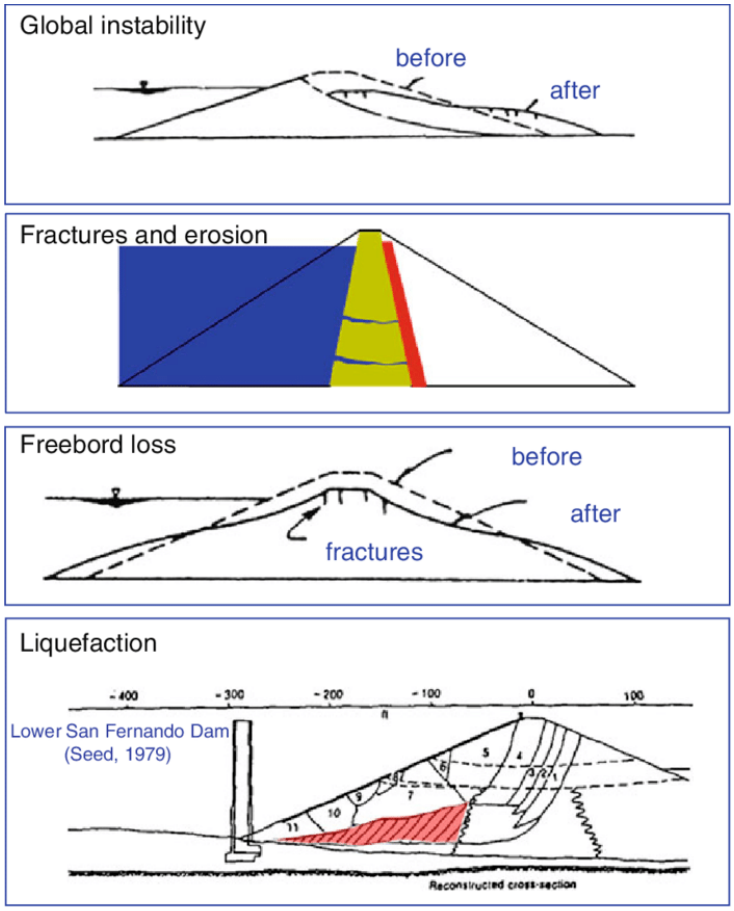


Figura 175 - Possibili fenomeni pericolosi conseguenti ad un sisma

Va precisato in ogni caso che il rischio maggiore connesso all'azione sismica resta il movimento sussultorio del terreno e le sue conseguenze dal punto di vista strutturale, in quanto tendenzialmente gli invasi vengono già naturalmente progettati per ridurre al minimo l'impatto di onde non stazionarie sulla struttura (ad esempio il fenomeno di wind wave che risulta abbastanza comune in esercizio, vedasi Figura 176). Per tenere conto di tutti i fattori diventa necessario svolgere studi caso per caso, capaci di prendere in considerazione le condizioni al contorno dell'opera in esame.

Figura 176 - Esempio di wind wave sulla Waitaki Dam in Nuova Zelanda

6.2.4 La risposta strutturale delle dighe ai terremoti

Nell'ambito delle dighe in calcestruzzo, l'azione sismica si rende principalmente colpevole dell'apertura di fessure nel cemento, senza dimenticare tuttavia il rischio connesso alla debolezza delle zone di giuntura, che potrebbero costituire un percorso preferenziale di perdita idrica.

Le dighe in terra sembrano invece più sensibili a fenomeni di deformazione sulla sommità della struttura e tendono a collassare, a seguito di un evento sismico, per problemi di filtrazione nel corpo diga e per erosione interna (Figura 177).

Figura 177 - Crollo di una diga in terra per Overtopping dopo un sisma

Una classificazione delle conseguenze su base tipologica, come anche di ampiezza di invaso o di altezza, non sarebbe tuttavia esaustiva, in quanto ogni diga tende a reagire in maniera autonoma rispetto alle altre; inoltre, la statistica a riguardo appare ancora poco robusta, in quanto si annovera un numero limitato di casi di collasso a seguito di terremoto. Questo perché, fortunatamente, le misure di sicurezza intraprese in fase di progetto sono decisamente cautelative e il danneggiamento dei bacini si interrompe spesso prima di arrivare ad un crollo generalizzato. L'analisi di rischio tende quindi a spostarsi piuttosto su tutte le strutture accessorie, che al contrario si dimostrano

molto più esposte: tornando all'esempio del terremoto di Wenchuan, che si ricorda non aver prodotto alcun incidente catastrofico, sono state numerose le frane che hanno coinvolto le centrali idroelettriche limitrofe, interrompendone l'attività e richiedendo tempi estesi di ripristino

6.2.5 La previsione dei terremoti

In caso di potenziale evento di piena, è buona norma per gli invasi maggiori quella di anticipare il verificarsi di fenomeni dannosi attraverso lo svuotamento anticipato dell'invaso, fino a livelli ritenuti compatibili con le richieste di sicurezza. Si ha una reale possibilità di rendere efficace questa misura grazie agli immensi sviluppi che la Scienza Meteorologica ha conseguito negli ultimi decenni, arrivando a prevedere condizioni atmosferiche avverse con giorni, se non settimane di anticipo, e con una precisione tale da minimizzare l'occorrenza di falsi allarmi.

Sarebbe quanto mai positivo poter riproporre questo tipo di misura precauzionale per la protezione sismica, se non fosse che la previsione dei terremoti rappresenta un argomento ancora molto dibattuto[183]. In particolar modo per i sismi più intensi (scala Richter maggiore di 5), risulta ad oggi impossibile anticipare intensità, luogo e tempo con una precisione significativa; non è un caso se si ragiona abitualmente con una probabilità di occorrenza di un terremoto avente determinate caratteristiche in un'area delimitata. Tale stima si articola spesso su periodi di decine di anni, ovviamente incompatibili con le necessità di allerta legate ad uno sbarramento (Figura 178).

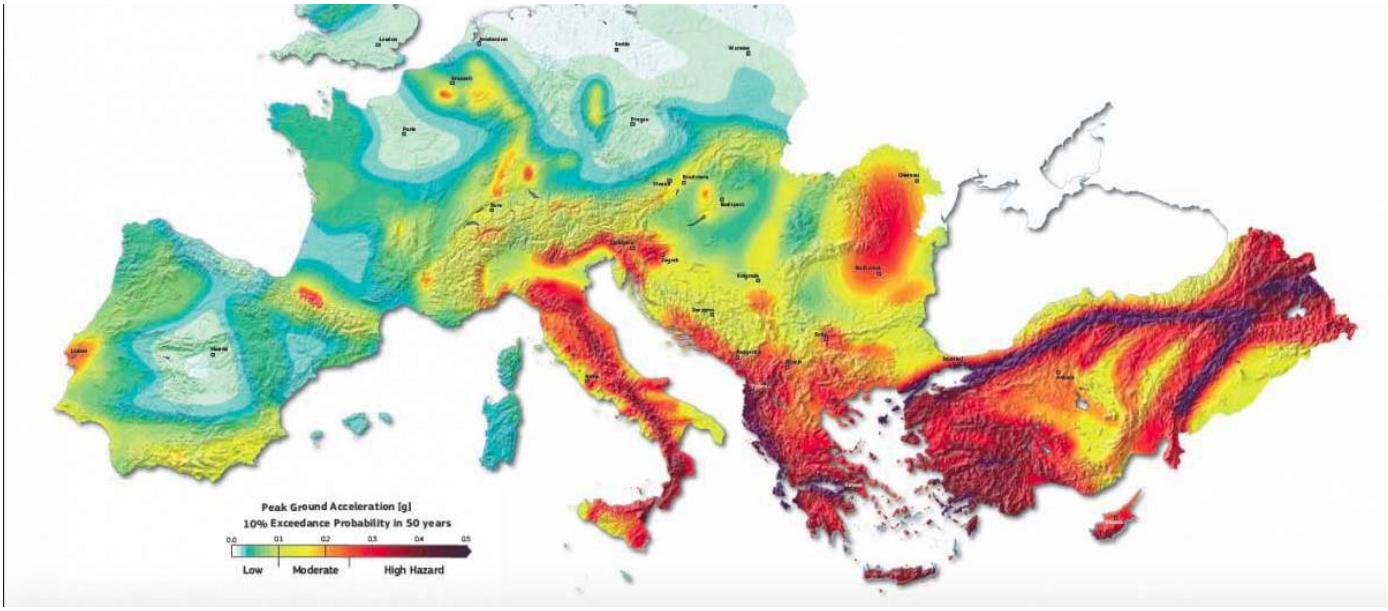


Figura 178 - Probabilità di superamento della PGA in Europa, su base cinquantennale

Il progetto delle dighe deve quindi forzatamente continuare a concentrarsi su come sincerarsi che le dighe possano sopportare il sisma più intenso che si presume possa colpire l'area. E' altresì vero che la condizione di progetto privilegiata deve restare quella a bacino pieno, sebbene per un numero contenuto di tipologie strutturali (quali le dighe ad arco) il sisma si dimostri talvolta più pericoloso in assenza di acqua. Nell'ottica di privilegiare come di consueto la salvaguardia della vita umana

[183] Wiemer, «Earthquake Statistics and Earthquake Prediction Research».

(nel caso specifico la popolazione residente a valle dell'invaso), tale considerazione non viene presa in conto nemmeno quando rappresenterebbe effettivamente il Worst Case Scenario.

6.2.6 Le possibilità di terremoti indotti dalle dighe stesse[184]

Finora si è analizzata la correlazione tra sismi e relativi danni sulle dighe. Per quanto possa sembrare paradossale, gli scienziati non hanno escluso che possano essere gli invasi stessi, in particolari e rari frangenti, a contribuire alla nascita di tensioni nel sottosuolo potenzialmente in grado di liberarsi sotto forma di terremoto (Figura 179).

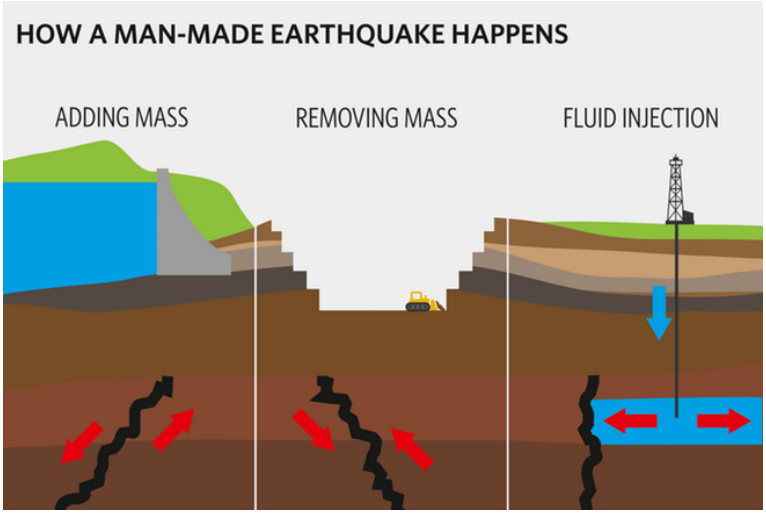


Figura 179 - Opere umane potenzialmente predisponenti a sismi

Naturalmente, la presenza di grandi dighe sottoposte a carichi idrici notevoli, e magari oscillanti, non risulta di per sé sufficiente a scatenare piccoli sismi, poiché prerequisito imprescindibile resta il concomitante sviluppo sotterraneo di faglie attive nella regione di appartenenza. Altra condizione predisponente, ancorché non strettamente necessaria, è una profondità di invaso superiore ai 100 metri. Sotto queste ipotesi, è possibile, per quanto improbabile, che si verifichi quello che in ambito scientifico è noto come Reservoir-Triggered Seismicity (RTS). Il rischio connesso a tali fenomeni non riguarda solitamente la diga in sé, in quanto nel corso della Storia sono stati registrati unicamente 6 eventi sismici autoindotti di intensità superiore a 5.7 della scala Richter, e comunque mai al di sopra di 6.3. Si tratta di un range di valori assolutamente compatibile con le misure antisismiche caratteristiche delle grandi dighe; discorso diverso per i centri abitati adiacenti al sito della diga, che tendenzialmente non possiedono un grado di protezione sismica altrettanto elevato. Va comunque sottolineato come si tratti di una situazione piuttosto eccezionale e che nella maggior parte dei casi conduce unicamente alla liberazione di un'energia sismica incapace di generare seri danni alle strutture. Per completezza, si indicano di seguito alcuni esempi significativi a livello mondiale[185]:

- Hsingfengkiang buttres dam, Cina: si tratta di uno dei rari casi in cui il terremoto generato dalla diga ha finito per creare danni non trascurabili alla struttura stessa, senza degenerare comunque in un crollo;

[184] Ramesh Chander «Can Dams and Reservoirs Cause Earthquakes? »
[185] ICOLD «Bulletin 137»

- Mratinje arch dam, Yugoslavia: due episodi di RTS a bassa intensità, a distanza di 17 anni (periodo durante il quale erano stati appositamente installati sismometri), hanno permesso di approfondire il fenomeno;
- Kurobe arch dam, Giappone: falso allarme, in quanto dei movimenti microsismici avevano suscitato l'illusione che la diga fosse predisposta a RTS;
- Takase Rockfill dam, Giappone: analogo al caso precedente.
- Poechos embankment dam, Peru: la scoperta di un fenomeno di RTS ha richiesto un'analisi approfondita, in quanto precedentemente lo stesso risultavo nascosto da una serie di vibrazioni esogene quotidiane e attività sismica di base

6.2.7 Banca dati ICOLD

A partire dalla costruzione della prima diga in calcestruzzo dotata di accorgimenti antisismici (USA, anni '30), lo studio del rapporto tra i terremoti e le opere di invaso ha subito un forte impulso, già stimolato in realtà dagli sbarramenti in terra del Giappone anni '20, in cui si iniziava a combinare l'azione sismica con quella idrodinamica. Nel secondo dopoguerra questo tema è stato oggetto privilegiato del lavoro di ricerca di ICOLD, al punto tale da inaugurare una Commissione esclusivamente dedicata nel 1968; grazie al materiale raccolto da quest'ultima, hanno potuto vedere la luce numerose pubblicazioni a riguardo, di cui si sottolineano le più importanti:

- Bulletin 62 (1988): Ispezione post-incidente delle dighe sottoposte a sisma
- Bulletin 72 (1989): Selezione dei parametri sismici per grandi dighe
- Bulletin 112 (1998): Tettonica e dighe
- Bulletin 113 (1999): Osservazione sismica delle dighe
- Bulletin 120 (2001): Design progettuale antisismico di dighe e sbarramenti
- Bulletin 123 (2002): Valutazione sismica delle strutture secondarie delle grandi dighe
- Bulletin 137 (2010): Invasi e sismicità

6.2.8 Caso studio: Koyna Dam

Nome della diga: Konya Dam
Localizzazione: India
Tipologia: Concrete Gravity Dam
Fenomeno: Sisma intenso
Data dell'evento: 11 Dicembre 1967
Data di costruzione: 1963 (termine lavori, iniziati nel 1954)
Descrizione strutturale: la diga Konya è costruita sul fiume omonimo, che scorre nel Sud-Ovest dell'India. Si caratterizza per un'altezza di 103 metri e una lunghezza di 853 metri; l'intera opera è realizzata attraverso l'unione di diverse sezioni monolitiche in cemento armato e prevede uno sfioratore superficiale al centro dell'opera per un'estensione di 91,4 metri. Le giunzioni tra le parti non sono state completate in calcestruzzo, bensì in rame e rappresentavano un elemento di debolezza. Il progetto originale prevedeva l'impiego unicamente di materiale grossolano per l'impasto cementizio, ma durante la costruzione si optò per l'integrazione tramite cemento alleggerito (sistema a bolle d'aria); il ricoprimento sul paramento esterno ed interno venne comunque eseguito con cemento tradizionale, per minimizzare il rischio di erosione.
La capienza dell'invaso era di circa 3 miliardi di metri cubi, destinati ad accogliere il frutto di un'intera stagione di monsoni, per poi destinare questa riserva all'irrigazione e in misura minore

alla produzione di energia. Le fondazioni poggiavano su uno strato di pietra vulcanica (basalto) ad alta resistenza, ma che mostrava comunque piccole fratture di origine termica riempite da materiale argilloso; i vuoti vennero riempiti e consolidati mediante tecnica di jet-grouting. Al di sotto di questo strato si trovavano gneiss e graniti che sembravano scongiurare problemi di instabilità; tuttavia, venne sottovalutata la sismicità della zona, anche se le prime scosse vennero registrate già in concomitanza con le operazioni di riempimento del bacino.
Causa scatenante: la diga venne sottoposta ad un sisma di intensità 6.5 sulla scala Richter, capace di generare sollecitazioni dieci volte superiori alla soglia di progetto della struttura (che non presentava sufficienti accorgimenti antisismici). L'opera si trovava relativamente vicina all'ipocentro del terremoto (posto a 8 chilometri di profondità sotto un punto distante circa 13 chilometri dal sito). L'evento principale si concluse molto rapidamente, nello specifico durando non più di 6 secondi, durante i quali l'invaso si trovava quasi al limite della propria capacità di progetto, ovvero ad un'altezza di 92 metri. Nelle settimane successive si verificano altre sei scosse non trascurabili, tutte caratterizzate da un'intensità compresa tra 5.5 e 6.2 della scala Richter, oltre ad un diffuso sciame sismico secondario (Figura 180).

TABLE 1

COMPARISON OF GROUND MOTION

Location	Component	Max. Accel. (g)	Spectrum Intensity, 20% Damping	Duration of Strong Phase (secs)
Koyna, India Dec. 11, 1967	Longitudinal	0.63	Av. 1.77	6
	Transverse	0.49		
	Vertical	0.34	1.69	
El Centro, Calif. May 18, 1940	NS	0.33	Av. 2.71	24
	EW	0.23		
	Vertical	0.28	0.69	
Taft, Calif. July 21, 1952	N69W	0.18	Av. 1.91	17
	N21E	0.17		
	Vertical	0.12	0.58	

Figura 180 - L'entità del sisma di Koyna confrontata con altri terremoti significativi

Comportamento durante il fenomeno: l'accelerogramma principale ospitato dalla diga (all'interno del blocco monolitico 13) non riuscì ad entrare in funzione; fortunatamente quello di riserva posizionato all'interno di una galleria di controllo rimase attivo e registrò una PGA (Peak Ground Acceleration, ovvero l'accelerazione del terreno al termine del sisma, prima dell'inizio delle oscillazioni libere) di 0,63g lungo l'orizzontale e di 0,34g lungo la verticale. Lo spostamento relativo del terreno in direzione longitudinale toccò quota 1,34 metri con una velocità di picco di 0,4 m/s. Malgrado il design antisismico della diga prevedesse di salvaguardare la struttura entro una soglia di 0,05g, la diga di Konya rimase in piedi senza perdite idriche significative ad un terremoto di intensità dieci volte maggiore. Naturalmente, non furono evitati danni diffusi su tutta l'opera: si formarono estese fratture orizzontali, sia sul paramento di valle che quello di monte, concentrate in prossimità dello sfioratore superficiale a causa della concentrazione degli sforzi. Fu interessante notare come il blocco monolitico maggiormente rovinato era stato progettato in maniera asimmetrica. Si assistette inoltre a fenomeni di filtrazione localizzata sulla spalla sinistra del corpo diga e a spostamenti relativi in corrispondenza dei giunti di collegamento; quest'ultimo fenomeno era prevedibile a causa dei metodi di vibrazione differenziati tra i vari monoliti, che spesso tra

l'altro presentavano altezze non coincidenti. Non si registrarono invece debolezze particolari all'interno delle fondazioni, in cui tra l'altro le pressioni interstiziali variarono di poco.
Misure intraprese: si provvide immediatamente a ridurre l'altezza del bacino, sia per ragioni di monitoraggio delle conseguenze, sia soprattutto per procedere con le riparazioni più impellenti. Le brecce maggiori vennero sigillate con iniezioni di resina espansiva. Si introdusse uno stato di pretensionamento dell'armatura nei blocchi di dimensioni maggiori. Infine, una volta risolta l'emergenza, la diga venne ulteriormente stabilizzata con l'inserimento di speroni sul paramento di valle. E' significativo infine sottolineare come il terremoto produsse numerosi crolli e vittime nell'agglomerato cittadino a ridosso dell'opera, a riconferma dell'intensità sismica assolutamente non trascurabile.
Analisi post-evento: Chopra e Chakrabarti si occuparono di realizzare un modello fisico in scala di alcune sezioni notevoli del corpo diga. A seguire, venne condotta nel 1994 un'analisi col metodo degli elementi finiti ad opera di Chavez e Fenves (Figura 181). La conclusione comune di questi e altri studi condotti sulla diga e la sua risposta al terremoto confermarono i sospetti iniziali, ovvero che la diga si mostrò particolarmente sensibile all'azione sismica a causa di un accorgimento strutturale tipicamente indiano. Considerando infatti la decrescita delle sollecitazioni statiche con l'aumentare dell'altezza, la diga di Konya venne realizzata con calcestruzzi sempre meno performanti man mano che l'opera si sviluppava verticalmente. Si tratta di un design progettuale che tende ad inficiare la performance in campo sismico, quando invece le porzioni più colpite sono quelle che si distanziano maggiormente dal livello del terreno.

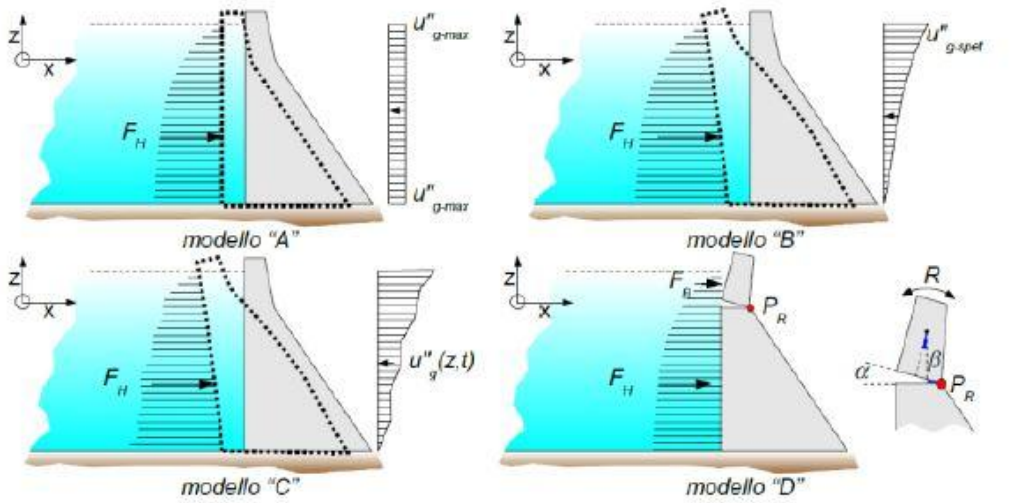


Figura 181 - Studio dell'azione sismica con l'aumentare dell'altezza, per diversi modelli di azione sismica

6.3 Internal Erosion

6.3.1 Introduzione generale al fenomeno

Il problema dell'erosione interna affligge naturalmente in via preferenziale gli invasi in terra, in quanto quest'ultima, al netto di interventi di compattazione e impermeabilizzazione, si dimostra tendenzialmente molto suscettibile all'azione erosiva dell'acqua, in particolar modo a livello interstiziale (l'acqua accumulata nei pori del materiale granulare, che genera una spinta idrostatica instabilizzante verso l'alto). Tuttavia, sarebbe scorretto ridurre il fenomeno all'ambito delle dighe in terra, in quanto anche quelle realizzare in cemento armato e roccia spesso vanno a poggiare su uno strato di fondazione in materiale sciolto (dando potenzialmente origine al fenomeno di Piping attraverso la fondazione, che può risultare perfino più dannoso)[186]. Le problematiche legate all'erosione interna sono molteplici, ma possono essere riassunte nella seguente categorizzazione:

- Piping, nell'accezione tradizionale del termine
- Scour
- Erosione progressiva
- Sollevamento
- Soffusione

Si tratta in ogni caso di manifestazione dello stesso fenomeno ma con conseguenze diverse sulla stabilità del corpo diga, e quindi anche associate ad un rischio peculiare a seconda della predisposizione dell'opera a subire maggiormente determinate criticità.

6.3.2 Piping

Il Piping resta una delle ragioni più diffuse di crollo di dighe e sbarramenti; a livello pratico si configura come un flusso di acqua in pressione all'interno del corpo diga (o della fondazione dello stesso) che progressivamente crea un canale erosivo andando a rimuovere materiale, il quale finisce in sospensione e contribuisce a creare ulteriore turbolenza nel flusso, con conseguente innesco sempre più pronunciato. Le criticità emergono nel momento in cui l'apertura raggiunge la superficie del paramento esterno della diga; il problema risiede nel fatto che, nel momento in cui il fenomeno risulta manifestamente visibile, esso è già in azione da tempo all'interno del paramento. Il suo impatto sull'opera è generalmente significativo per le strutture in terra, ma potrebbe essere contrastato anche in questo caso tramite opportune precauzioni di compattazione del materiale impiegato. Le cause scatenanti del Piping sono da rintracciare nella suscettibilità del terreno all'erosione (in particolare risulta notevolmente sensibile il "dispersive soil", ovvero materiale granulare a bassa coesione) e lo stato di sforzo all'interno del paramento, con particolare riguardo allo sforzo di taglio agente su ogni elemento infinitesimo. Quest'ultimo infatti conserva la capacità di rompere con relativa facilità i deboli legami elettrostatici e meccanici tra le particelle del terreno. A queste condizioni predisponenti, si aggiungo alcuni fattori imprescindibili per l'evoluzione del canale erosivo, quali ad esempio la permeabilità del paramento di valle e una certa coesione nel materiale che costituisce la parte superiore del canale (il cui sviluppo si arresterebbe immediatamente, altrimenti).

[186] Prinsco, «Pipe through Embankment Dams»

6.3.3 Scour

Il fenomeno di "Scour" risiede sempre nell'ambito dell'erosione, ma in questo caso l'azione dannosa si registra in presenza di flussi d'acqua particolarmente turbolenti intorno a elementi che ne aumentano ulteriormente il numero di Reynolds (e con esso l'entità della turbolenza)[187]. E' la situazione tipica delle pile da ponte, che non a caso si dimostrano notevolmente sensibili a questo tipo di criticità. L'erosione si verifica, per la precisione, quando il flusso idrico incontra un ostacolo che lo obbliga a cambiare direzione e ad accelerare; in questo frangente, parte del materiale granulare in corrispondenza dell'ostruzione può finire in sospensione. I punti che possono costituire un innesco privilegiato dello "Scour" sono da rintracciare, nell'ambito di dighe e sbarramenti (in quanto normalmente si tratta di un problema connesso con le strutture di attraversamento dei fiumi o le palificate sulla costa), nelle imperfezioni del paramento interno di una diga in terra, o addirittura intorno a opere accessorie come potrebbe essere una piattaforma operativa a poca distanza dal paramento della diga. Analogamente agli altri esempi di erosione, la sua entità dipende strettamente dalla velocità del flusso e in particolar modo dalla turbolenza dello stesso.

[187]George, Annandale, «Dam Failure by Rock Scour: Evalulation & Prevention (A Case Study)»

7 EVENT TREE ANALYSIS

7.1 Insufficient Spillway Capacity (Overtopping)

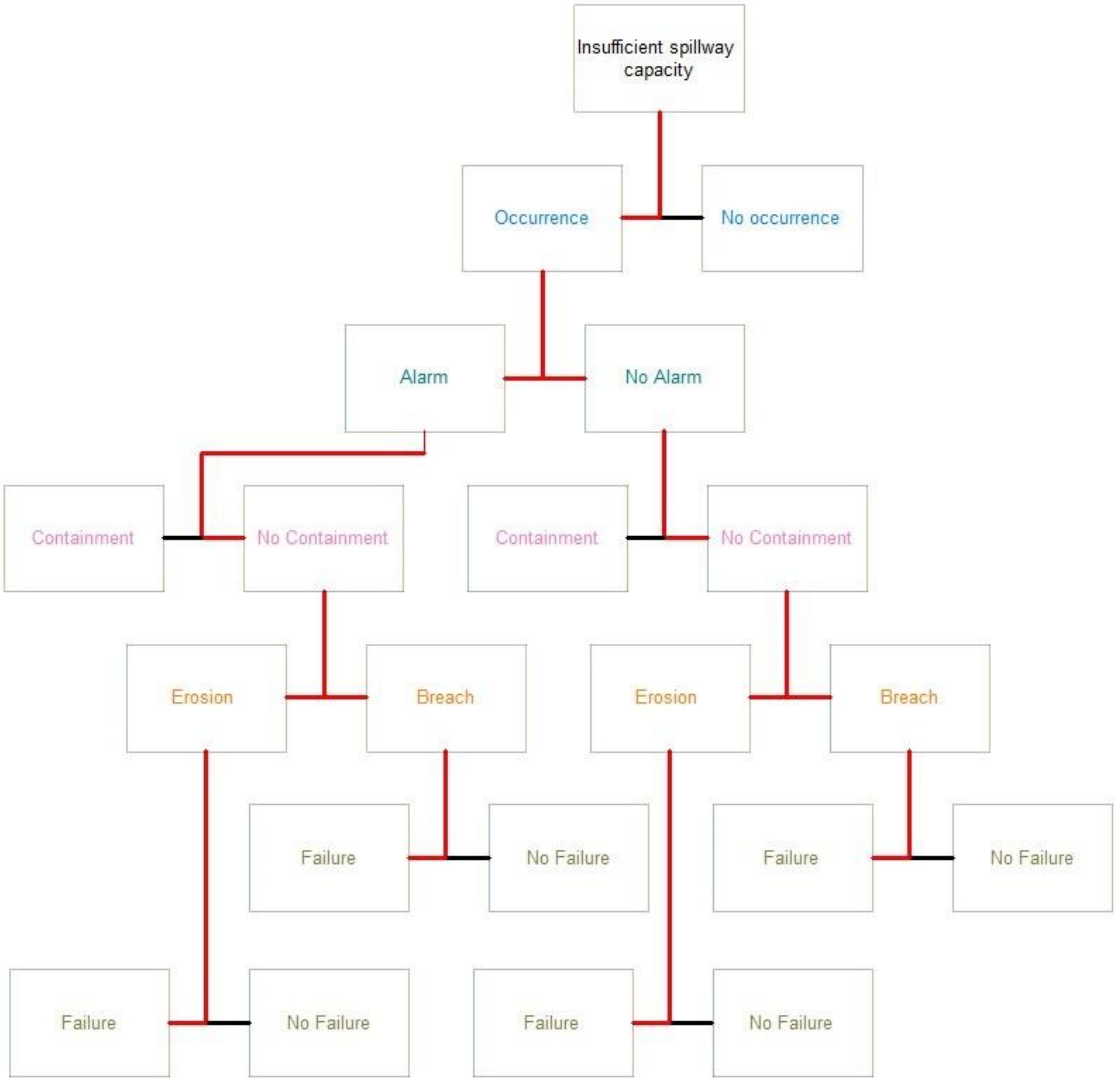


Figura 182 - ETA per Insufficient Spillway Capacity

7.1.1 Occurrence/No occurrence

Facendo riferimento ai dati contenuti nel database (costruito a partire da 13 fonti diverse, per un totale di più di 3600 record univoci), quello dell'"Insufficient Spillway Capacity" è il quinto fenomeno per occorrenza relativa, con un tasso di presenza di poco superiore al 7%. Si tratta quindi di un problema abbastanza diffuso, anche se spesso rischia di essere confuso, nell'ambito dell'Overtopping, con il più frequente "Extreme flood exceeding design criteria", con il quale condivide numerosi aspetti[188]. Si tratta sempre infatti di criticità relative alla difficoltà, da parte del sistema di smaltimento della diga, di eliminare il surplus idrico che rischierebbe di generare un carico esagerato sulla struttura, nonché di aumentare il rischio di erosione, in particolare sul

[188]Kerachian, «Spillway Capacity Optimization under Hydrologic Uncertainties and Flood Routing»

paramento esterno (una delle cause predisponenti più significative per il crollo da overtopping). La differenza sostanziale riguarda piuttosto le modalità con cui tale fenomeno si verifica: nel caso di insufficiente portata eliminata attraverso lo sfioratore, non si è forzatamente in presenza di un evento meteorologico al di sopra dei livelli di guardia. Potrebbe al contrario realizzarsi anche in condizioni standard, a causa di una progettazione errata della capacità dello sfioratore stesso, di una scarsa manutenzione dell'opera (che potrebbe portare all'accumulo di detriti in corrispondenza dello sfioratore, oppure al deterioramento del materiale con conseguente modifica del profilo) oppure ad operazioni sul bacino non coerenti con le misure di sicurezza predisposte. Nell'ottica di razionalizzare in maniera efficace la distinzione tra i due fenomeni (che, pur presentando un ETA pressoché identico (Figura 182), presentano probabilità di occorrenza sui vari nodi ben diverse, come verrà approfondito nei paragrafi seguenti), si è scelto di attribuire l'"Insufficient Spillway Capacity" a tutti i casi di comprovato Overtopping in cui però non si registrava un significativo aumento del livello idrico in seguito a precipitazione, bensì per inadeguatezza progettuale o scorrettezze procedurali (Figura 183).

Figura 183 - L'incidente dell'Oroville Dam (California, USA), in cui l'overtopping si è verificato per l'errata progettazione dello sfioratore di emergenza

7.1.2 Alarm/No Alarm

Trattandosi di un problema ricadente nella macro-categoria dell'Overtopping, come già analizzato diffusamente nel capitolo dedicato a questo fenomeno all'interno dei Failure Modes, l'allerta gioca un ruolo importante, in quanto un'anticipazione della criticità potrebbe consentire di prendere misure e precauzioni tali da abbattere il rischio di crollo; ad esempio, si parla della possibilità di ridurre con anticipo il volume d'acqua ospitato nel bacino per lasciare lo spazio al surplus idrico e limitare così il carico sullo sfioratore. Tuttavia, in caso di precipitazioni intense, vi è la tangibile opportunità di prevedere con relativa certezza, grazie ai notevoli progressi in ambito meteorologico, l'entità della piena da gestire all'interno del bacino; per quanto riguarda l'"Insufficient Spillway Capacity", come anticipato nel paragrafo precedente, si tratta piuttosto di criticità strutturali o di un design approssimativo dello sfioratore, che possono originare problemi, incidenti e addirittura crolli anche in situazioni di afflusso standard, quindi con meno possibilità di avvisaglie. E' per questo motivo che il monitoraggio dovrebbe piuttosto focalizzarsi sulla manutenzione dello sfioratore (in

particolare andando a rimuovere eventuali occlusioni parziali), oltre naturalmente a prevedere studi progettuali su modelli fisici o numerici per anticipare potenziali problematiche in esercizio. Il rispetto di questi accorgimenti consente di contenere al di sotto di una certa soglia il rischio di incidente, senza tuttavia poterlo abbattere in toto. E' stata di conseguenza prevista la prosecuzione del path in entrambe le direzioni, con l'ovvia accortezza di tarare le successive probabilità di danno sulla base dell'avvenuta o meno allerta.

7.1.3 Containment/No Containment

Questo nodo dipende ovviamente, dal punto di vista probabilistico, dal passaggio precedente "Alarm/Not Alarm". Tuttavia, le modalità di sviluppo delle criticità sono identiche, e si basano fondamentalmente sull'effettiva opportunità di contenere il surplus idrico generatosi a causa della deficienza di smaltimento dello sfioratore. L'operazione in questione risulta piuttosto complicata in entrambi i casi, in quanto si tratta spesso di fenomeni rapidi che richiederebbero una reazione immediata. La procedura più tradizionale richiede di ridurre l'entità di volume all'interno del bacino attivando sfioratori secondari oppure aprendo le paratie sommerse, operazioni che in ogni caso comportano una perdita di capacità di invaso (e una inevitabile riduzione della produzione di energia per gli impianti idroelettrici, o di approvvigionamento per i bacini di accumulo, con conseguenze anche a livello economico)[189]. Se invece si è in presenza di occlusione dello sfioratore a causa di accumulo di detriti, si potrebbe ricorrere ad una barriera galleggiante in materiale polimerico dalla facile e veloce installazione, capace per sua natura di intercettare tronchi, rifiuti e altri elementi flottanti appena a monte dello sfioratore (Figura 184).

Figura 184 - Barriera di emergenza sul fiume Ohio, a monte della Belleville Dam

Se effettivamente il fenomeno di sommersione dello sfioratore e successivo sormonto viene impedito, il rischio di crollo tende naturalmente ad azzerarsi; per questa ragione, non vi è proseguimento del path nella direzione "Containment"; al contrario, l'assenza di misure di emergenza porta forzatamente a fenomeni erosivi o addirittura alla formazione di vere e proprie aperture sul paramento di valle. Sebbene a questo punto del processo sia impossibile evitare un danneggiamento sulla superficie della diga, non è ancora da escludersi la salvaguardia dell'integrità strutturale della stessa, a patto che si verifichino le condizioni illustrate nell'ultimo paragrafo del presente capitolo.

[189] ANCOLD, «Queensland Dam Safety Management Guidelines»

7.1.4 Erosion/Breach

Una volta verificatosi il fenomeno di overtopping, il flusso d'acqua tende a interessare in maniera sempre più pronunciata il paramento di valle della diga (Figura 185).

Figura 185 - Fenomeno di Overtopping studiato su un modello fisico di diga in terra

Spesso, l'entità del versamento non è di per sé sufficiente a costituire un rischio significativo per l'area circostante; la criticità risiede al contrario nell'esposizione della superficie del corpo diga ad una corrente, spesso molto turbolenta, che può andare ad erodere progressivamente due punti sensibili del corpo diga: da un lato, molto più frequente, è l'erosione in corrispondenza del coronamento dell'opera, con conseguente assottigliamento della barriera tra il bacino e la liberazione incontrollata; dall'altro, più rara ma al tempo stesso tendenzialmente catastrofica, non si può escludere l'apertura di una breccia al piede del paramento, o comunque in una posizione intermedia. In questa seconda situazione, risulta compromessa la stabilità complessiva del corpo diga e si può assistere al crollo repentino di un'intera porzione, con conseguenze disastrose, in quanto non soltanto aumenta a dismisura la quantità di liquido riversata a valle, ma al potere distruttivo di questa si aggiungono anche i detriti liberati dal collasso che vengono trasportati dalla corrente (Figura 186).

Figura 186 - I passaggi che portano al collasso di una diga in terra

7.1.5 Failure/No Failure

La probabilità di crollo di una diga sottoposta ad Overtopping per "Insufficient Spillway Capacity" dipende da tutta una serie di fattori, di cui si evidenziano i principali:

- Tipologia strutturale: trattandosi di un problema fortemente legato all'erosione, risulta immediato immaginarsi che le dighe più soggette ad overtopping siano quelle realizzate con materiali sensibili a questa criticità. In primo luogo, le dighe in terra offrono di per sé poca protezione nei confronti di un flusso turbolento d'acqua, a meno di precauzioni particolari quali impermeabilizzazione del paramento di valle e compattazione adeguata. Non sono tuttavia esenti da rischio le dighe in cemento armato, in quanto anche quest'ultimo, malgrado appaia maggiormente compatto, presenta delle aperture naturali (in conseguenza del suo deterioramento e delle tensioni di trazione a cui è sottoposto) attraverso cui l'acqua può infiltrarsi causando problemi strutturali[190]. Lo stesso dicasi per le dighe Rockfill, la cui discriminante in questo ambito riguarda principalmente la natura della roccia con cui sono realizzate: l'impiego di pietre prevalentemente prive di vuoti (granito, arenaria) è da preferire a quelle porose (basalto, calcare). (Figura 187)

[190] Amaral, « FAILURE BY OVERTOPPING OF EARTH DAMS. QUANTIFICATION OF THE DISCHARGE HYDROGRAPH»

Figura 187 - Copertura basaltica della Ataturk Dam (Turchia), soggetta a numerosi rischi strutturali

- Nell'impossibilità di subordinare la tipologia strutturale all'esigenza di protezione dall'overtopping, è necessario ricorrere a strategie che permettano di minimizzare il danneggiamento del paramento di valle quando si realizza il superamento del coronamento della diga. Ad esempio, si può fare riferimento agli interventi di ingegneria naturalistica capaci di conciliare il rispetto dell'ambiente con le esigenze funzionali dell'invaso. In particolare, rivestono un'importanza significativa gli "High-Performance Turf Reinforcement mat" (HPTRM) e gli "Articulating Concrete Block", le cui peculiarità verranno analizzate nel dettaglio nel corso del capitolo conclusivo dedicato alle misure da intraprendere per mitigare il rischio. Volendo soltanto accennare il loro apporto, basti sapere che per il primo si tratta di un tappeto che può ospitare e stimolare la crescita di vegetazione erbosa nell'ottica di abbassare la pressione interstiziale del paramento di valle e consolidare il pendio (Figura 188).

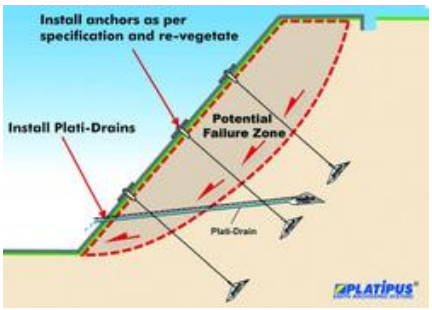


Figura 188 - Sezione di pendio dotata di HTPRM, con l'aggiunta di tiranti

Per il secondo invece si tratta di blocchi di calcestruzzo sagomabili secondo forme volute e dedicati al rinforzo del paramento di valle attraverso il posizionamento di tali elementi prefabbricati nelle zone più predisposte all'erosione (Figura 189).

Figura 189 - Ricoprimento tramite ABC's di una diga in terra

La probabilità di crollo (Failure) di una diga dipende quindi da quattro percorsi distinti, la cui discriminante principale riguarda l'effettiva possibilità di allerta e intervento prima del verificarsi dell'Overtopping, e quella secondaria sulla tipologia di incidente (breccia o semplice erosione). La frequenza attesa aumenta naturalmente in assenza delle precauzioni sopra indicate e si manifesta con un valore maggiore in caso di "No Alarm+Breach", mentre risulta minima in corrispondenza della combinazione "Alarm+Erosion"

7.2 Extreme Flood Exceeding Design Capacity (Overtopping)

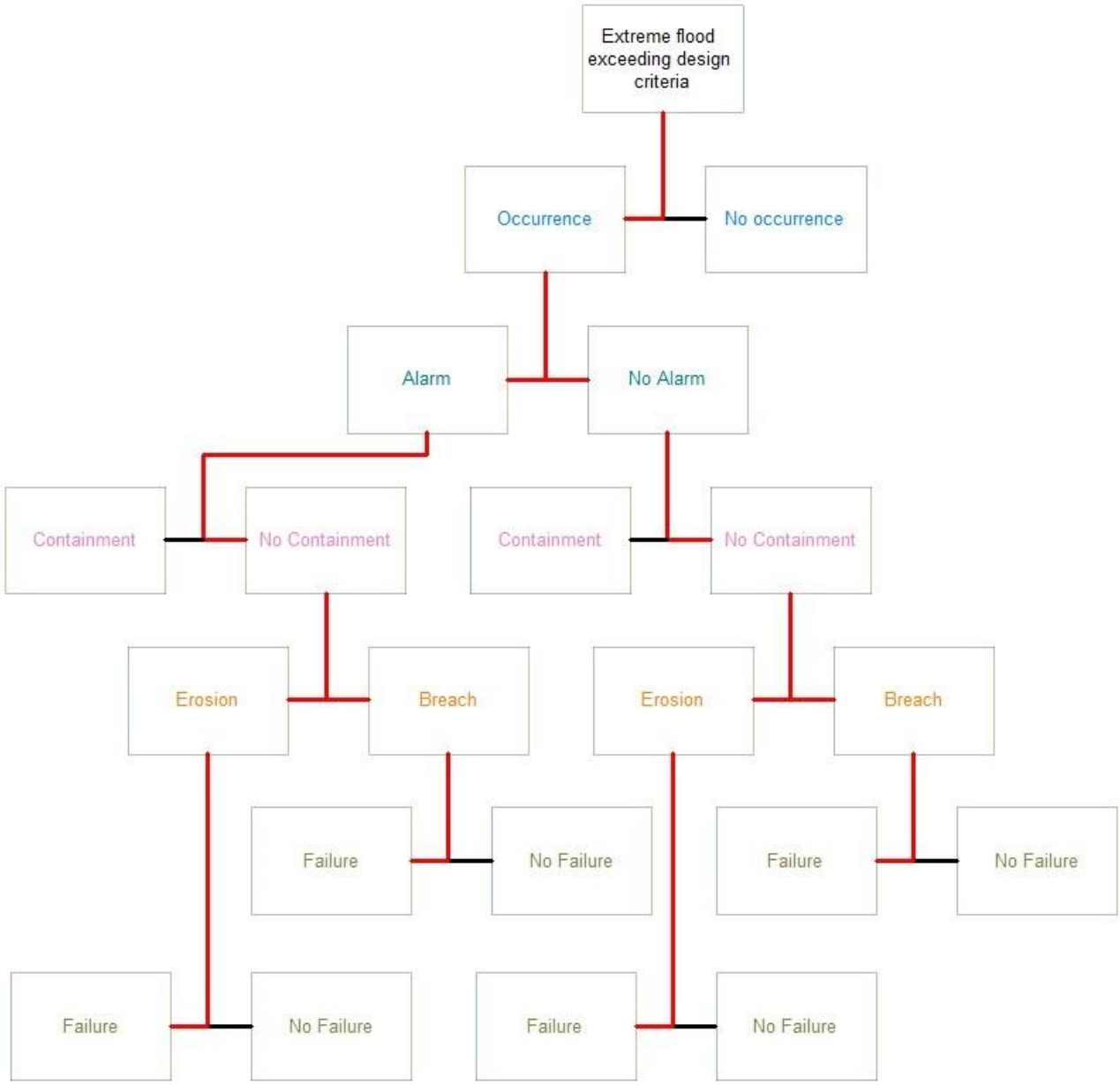


Figura 190 - ETA per Extreme Flood Exceeding Design Criteria

7.2.1 Occurrence/No Occurrence

Come già accennato al capitolo precedente, una quota assolutamente ragguardevole degli incidenti contenuti nel database è da imputare ad una piena improvvisa e che supera quella di progetto. Si parla addirittura di un caso su tre (33,47 %), andando a occupare anche la gran parte della casistica di Overtopping rispetto all'"Insufficient Spillway Capacity" (Figura 190). Come si può notare, il percorso dell'ETA resta identico, ma a variare sono le probabilità di occorrenza dei vari nodi; in particolare, fino al livello "Erosion/Breach" in cui si è effettivamente verificato il sormonto della diga e che dà origine a scenari quasi equivalenti (poco importa l'origine del fenomeno, a meno di qualche variazione nei meccanismi di azione), l'impatto di un determinato path dipende fortemente

dai nodi precedenti, la cui distribuzione probabilistica relativa dovrebbe variare abbastanza rispetto al caso dell'"Insufficient Spillway Capacity"[191]. Questo soprattutto a causa della correlazione diretta tra questo fenomeno e l'intensità di piena, un fattore a sua volta tendente ad influenzare notevolmente il successivo nodo "Alarm/No Alarm" (Figura 191)

Figura 191 - Burrinjuck Dam (Australia) durante un evento di piena

7.2.2 Alarm/ No Alarm

Vista la natura del fenomeno, derivante pressoché unicamente da grandi afflussi idrici di origine meteorica, l'apporto alla riduzione del rischio che un'allerta adeguata e sufficientemente anticipata potrebbe assicurare resta cruciale. In questi casi, infatti, l'accorgimento più immediato per il gestore della diga resta quello di imporre una riduzione progressiva del bacino nei giorni immediatamente antecedenti alla precipitazione, in modo tal che la massa d'acqua proveniente da monte possa essere ospitata all'interno del bacino senza indurre overtopping. Quindi, una delle differenze principali rispetto all'ETA del capitolo precedente riguarda il non trascurabile aumento di pericolosità di un evento "No Alarm" rispetto a "Alarm", che in termini pratici si traduce attraverso una maggiore difficoltà di contenimento al punto successivo, una preponderanza di possibilità di breccia rispetto alla semplice erosione e infine, per entrambe le tipologie di danno, una percentuale di crollo maggiore. Aumenta pertanto significativamente il divario di efficacia di qualsiasi intervento successivo sulla base delle potenzialità di allerta del sistema di sicurezza, che va curato in particolar modo (Figura 192)[192].

[191] Nistor, Rappai, Vanapalli, «Overtopping of earth embankments : Sensitivity analysis of dam breaching»
[192] Wieland, Mueller, «Dam safety, emergency action plans and water alarm systems»

Figura 192 - Esempio di sistema di allerta elettrico basato sul livello idrico del bacino (Middle Creek Dam, Montana, USA)

7.2.3 Containment/No Containment

Gli nodi successivi, a partire dal presente, non presentano significative differenze in termini di modalità rispetto a quelle descritte al capitolo precedente, in quanto la distinzione fondamentale riguarda la probabilità di occorrenza (molto maggiore per "Extreme Flood") e la distribuzione del rischio tra il caso con allarme e quello senza (che risulta più omogenea nel caso di "Insufficient Spillway Capacity"). L'unica peculiarità risiede nella possibilità di reazione decisamente anticipata che potrebbe favorire parzialmente la probabilità di effettivo contenimento della piena (con conseguente arresto del percorso di incidente), secondo processi più regolari e meno legati a situazioni di emergenza.

7.2.4 Erosion/Breach

Anche in questo caso, la configurazione di evento non subisce variazioni significative: si assiste di nuovo ad un flusso d'acqua che supera il coronamento della diga investendo il paramento di valle; quest'ultimo può essere sottoposto a erosione localizzata in prossimità dello sfioratore ("Erosion", Figura 193) oppure direttamente ad una più temibile breccia nel corpo diga ("Breach", Figura 193). L'unico fattore che potrebbe variare leggermente le condizioni al contorno riguarda il fatto che, durante una precipitazione intensa e in presenza di dighe in terra, il paramento potrebbe trovarsi già prossimo alla saturazione e mostrare una maggiore predisposizione alla nascita di ampie aperture, sbilanciando il rischio verso l'ipotesi di "Breach". In ogni caso, la distribuzione relativa tra i due nodi è dipendente in maniera netta dalla precedente suddivisione "Alarm/No Alarm", in quanto la mancata allerta resta una delle criticità maggiori che predispongono al crollo dell'opera[193].

[193]Mao, Wang et al. «Management System for Dam-Break Hazard Mapping in a Complex Basin Environment»

Figura 193 - Erosione (pronunciata) del coronamento della Jonquière Dam (Quebec, Canada)

Figura 194 - Breccia e collasso della diga in terra di Mount Polley (Canada)

7.2.5 Failure/No Failure

Valgono di nuovo i ragionamenti applicati al capitolo precedente; si dovrebbe tuttavia privilegiare una soluzione che induca un comportamento sicuro in caso di alluvione non soltanto per situazioni di overtopping, ma anche nell'ottica di salvaguardare il paramento delle dighe in terra da fenomeni erosivi indotti direttamente dalla precipitazione, per quanto meno invasivi rispetto al flusso libero di overtopping.

7.3 Piping in Dam Body (Quality Issues)

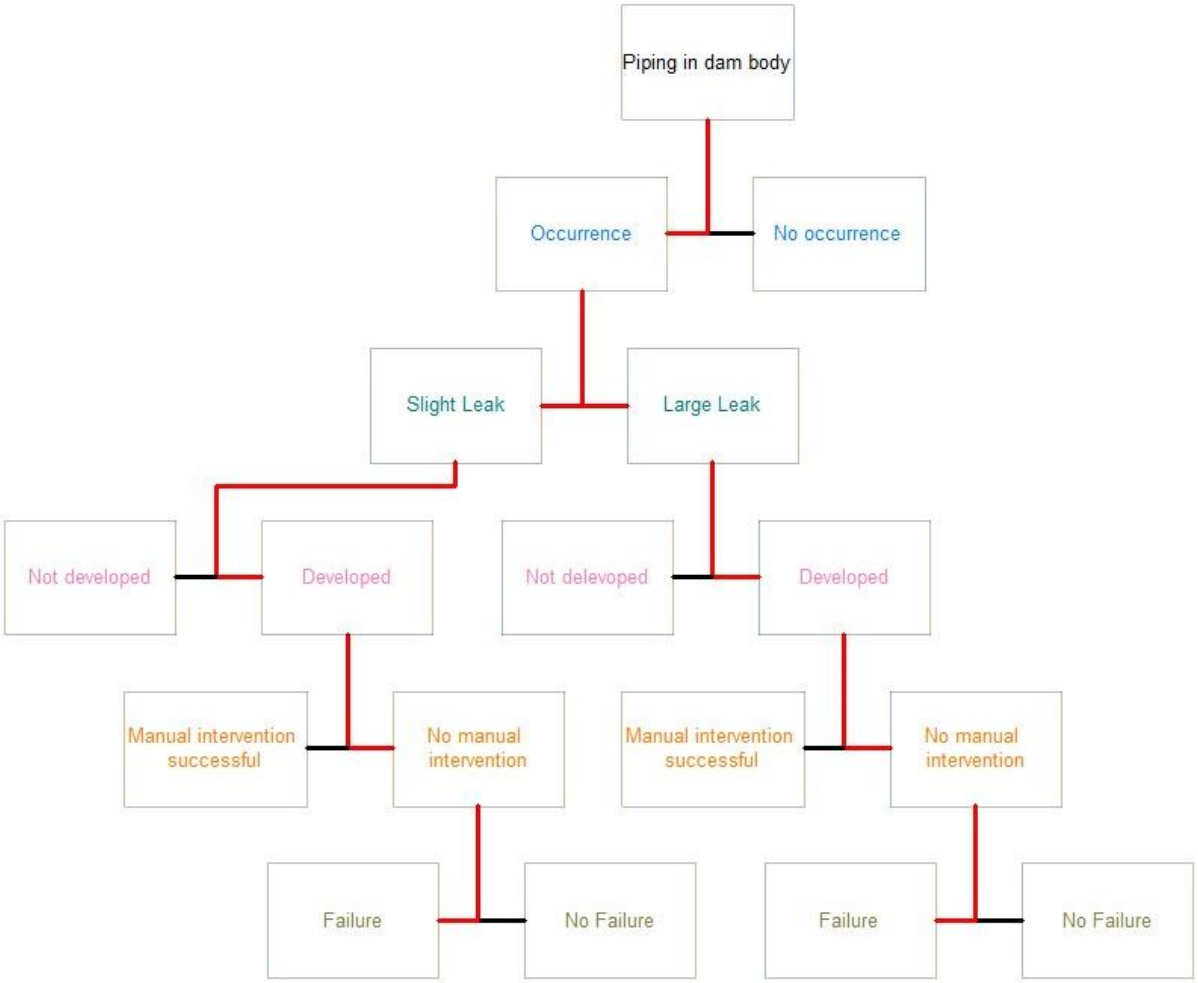


Figura 195 - ETA per Piping in Dam Body

7.3.1 Occurrence/No Occurrence

Il "Piping" (Figura 195), ovvero un fenomeno di filtrazione attraverso le strutture di un invaso, conserva una quota non indifferente di tutti gli incidenti che possono coinvolgere una diga, suddividendosi in maniera piuttosto regolare tra tutti i suoi elementi (corpo diga, sfioratore, canale di uscita, ecc…). Tuttavia, la debolezza strutturale sembra concentrarsi in corrispondenza del "Dam Body", la cui occorrenza è di circa 12,60 % sul totale di incidenti inseriti nella banca dati. La preponderanza relativa, soprattutto rispetto al "Piping in foundation", si può spiegare sia con la presenza diffusa di invasi in terra, per loro natura sottoposti più frequentemente a questo tipo di rischio, sia con l'attenzione particolare che si verifica in ambito di registrazione di dati ai problemi che possono intercorrere riguardo al paramento della diga. A livello pratico, il fenomeno si traduce nella creazione di un percorso di filtrazione più o meno esteso all'interno del corpo diga, che progressivamente migra dall'interno del bacino alla superficie del paramento di valle, portandosi dietro liquido misto a particelle in sospensione (rimosse dal corpo stesso) e creando un punto di debolezza all'interno dell'opera (Figura 196)[194]

[194] Xu, Zhang, «Simulation of Piping in Earth Dams Due to Concentrated Leak Erosion»

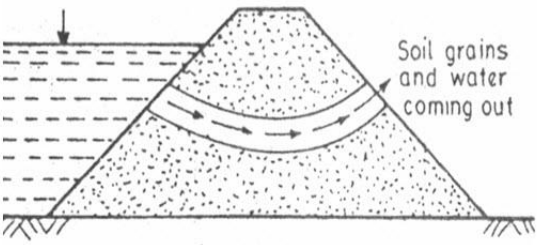


Figura 196 - Schema del fenomeno di piping attraverso il corpo diga

7.3.2 Slight Leak/Large Leak

Una delle discriminanti principali per comprendere le reali possibilità di collasso (o comunque nell'ottica di proseguire il path di incidente), riguarda l'entità del Piping: non potendo sondare, nell'ambito dell'ETA, l'intera gamma di estensioni del canale, si è scelto di differenziare in maniera netta tra "Slight Leak" (Piccola perdita) e "Large Leak" (Grande perdita). Naturalmente, stabilire una soglia precisa in termini, ad esempio, metrici di diametro o sezione richiederebbe studi approfonditi. Si può pensare, in prima approssimazione, di attribuire la categorizzazione di "Slight Leak" (Figura 197) a fori non più grandi di una decina di cm, mentre per le aperture di entità superiori fare riferimento alla "Large Leak" (Figura 198). Va inoltre tenuto conto del fatto che il fenomeno di Piping non è statico, ma al contrario tende ad evolvere sia in direzione longitudinale, come accennato nel paragrafo precedente, sia in maniera trasversale, con conseguenze talvolta disastrose.

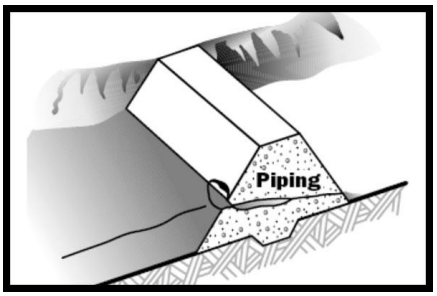


Figura 197 - Slight Leak in una ricostruzione grafica di un piccolo invaso in terra

Figura 198 - Large Leak sulla Fontenelle Dam, con conseguente crollo

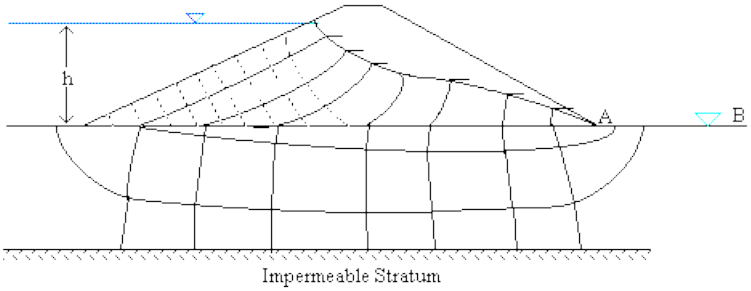
7.3.3 Not Developed/Developed

Questo snodo fotografa l'evoluzione del canale di filtrazione, in quanto esso può rimanere circoscritto alla parte interna del corpo diga (pur tenendo conto delle potenzialità evolutive del fenomeno) oppure svilupparsi fino ad interessare il paramento esterno, con conseguente innesco di un moto di filtrazione verso valle. Nel primo caso non vi è possibilità significativa di crollo (a meno di considerare l'eventuale innesco di altre condizioni critiche ad opera di cause diverse, come ad esempi un terremoto che va ad interagire con una struttura già di per sé indebolita dalla filtrazione), e per questo motivo il path si interrompe senza giungere a collasso; dall'altro lato si registra invece un nodo la cui entità in termini di occorrenza dipende dal passaggio precedente: è ovviamente più frequente che una "Large Leak" continui a svilupparsi fino all'esterno del corpo diga, rispetto ad un canale di filtrazione di dimensioni più contenute (Figura 199). In maniera analoga, s'intende che la successiva opportunità di intervenire manualmente sulla perdita sia fortemente correlata all'ampiezza del canale.

Figura 199 - Large Leak sviluppatosi fino al paramento esterno di una diga in terra

7.3.4 Manual Intervention Successful/No Manual Intervention

Rispetto al caso di filtrazione attraverso le fondazioni, il "Piping in Dam Body" presenta un'ulteriore criticità, soprattutto per quanto riguarda le possibilità di intervento attivo una volta individuata la perdita; può infatti accadere che essa si sia sviluppata ad un'altezza tale, sul paramento, da impedire o comunque rendere difficoltoso un intervento diretto volto a interrompere lo sviluppo del canale di filtrazione. Diventa quindi fondamentale agire a monte di questo fenomeno, basandosi sullo schema di filtrazione tipico per le dighe in terra (Figura 200)



Location downstream of a homogeneous dam where heave may occur - face AB

Figura 200 - Reticolo (tipico) di filtrazione al di sotto del corpo diga

Una volta appurata la distribuzione delle isoipse e delle isocore, che concorrono a comporre il reticolo di filtrazione, si può prevedere l'inserimento sul paramento di monte di un filtro, naturale o artificiale, capace di abbassare la quota piezometrica all'interno del corpo diga fino ad arrivare ad una condizione in cui la filtrazione si innesta al di sotto del tratto AB, impedendo alla radice qualsiasi fenomeno erosivo a valle. Riveste particolare interesse il filtro in materiale grossolano, che consente di inserirsi nel quadro dell'opera in maniera naturale e a basso costo (l'alternativa risiede in materiali di origine polimerica, che possono essere realizzati ad hoc per tarare l'apertura dei pori sulla base del materiale da filtrare); bisogna tuttavia calibrare con accuratezza la granulometria dell'ammasso filtrante. La soluzione più comunemente accettata dalla comunità scientifica è quella presentata dall'Università di Durham[195]

"To prevent migration of fines from the core:

D_{15}/D_{85} < *4-5*
(filter)/(zone being filtered)

D_{50}/D_{50} < *25*
(filter)/(zone being filtered)

For sufficient permeability:
D_{15}/D_{15} > *4-5*
(filter)/(zone being filtered)
To prevent segregation of the filter:
D_{60}/D_{10} < *20*
(filter)/(filter)"

Come si può notare, i criteri di selezione si basano sul passante percentile (identificabile attraverso l'indice in basso a destra), ovvero, nell'ambito di un'analisi granulometrica, il diametro in mm del setaccio in corrispondenza del quale si registra la percentuale indicata. I rapporti coinvolgono principalmente la combinazione filtro+materiale da filtrare, tranne per l'ultima condizione che è invece peculiare del filtro stesso.

[195] http://community.dur.ac.uk/~des0www4/cal/dams/foun/seep4.htm

7.3.5 Failure/No Failure

In assenza delle precauzioni sopra indicate, o comunque di interventi di emergenza durante l'evoluzione del fenomeno, diventa impossibile trascurare il rischio di crollo, che ovviamente risulta decisamente maggiore in corrispondenza di una "Large Leak". A livello operativo, si realizza attraverso un collasso della zona circostante la perdita, in seguito alle mutate condizioni idrodinamiche e alla perdita in sospensione di parte del materiale interessato dal percorso di filtrazione (Figura 201)

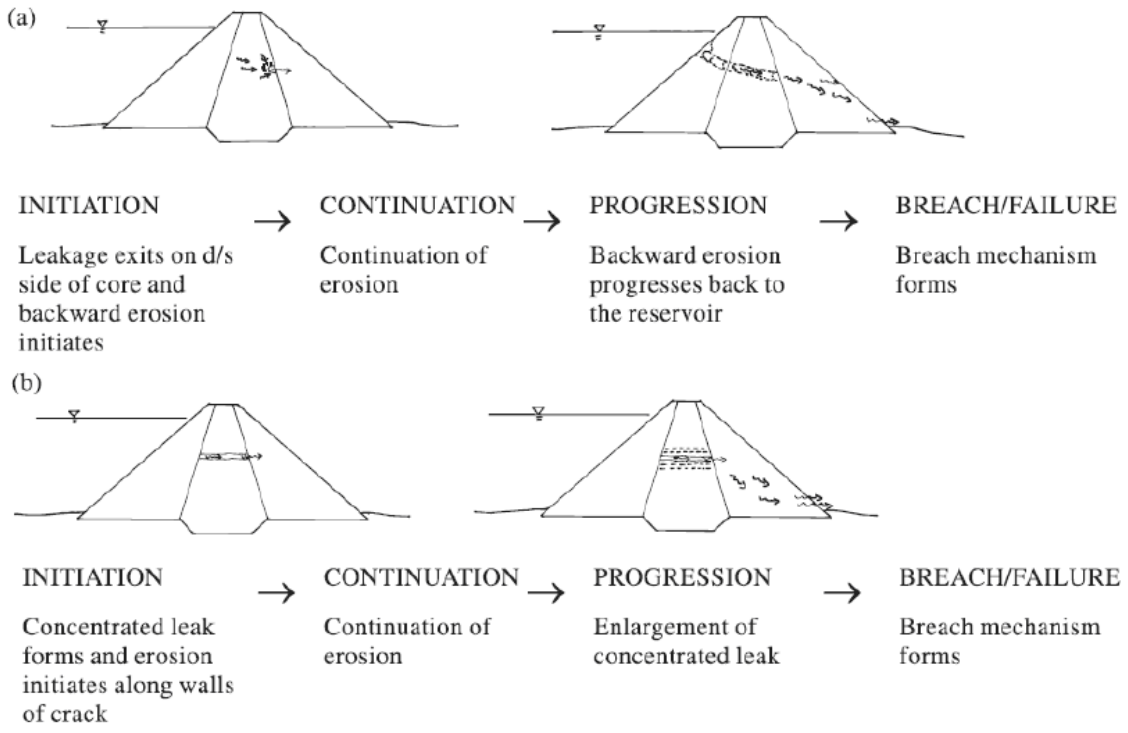


Figura 201 - Due potenziali processi di Piping nel corpo diga

7.4 Piping in Foundation (Quality Issues)

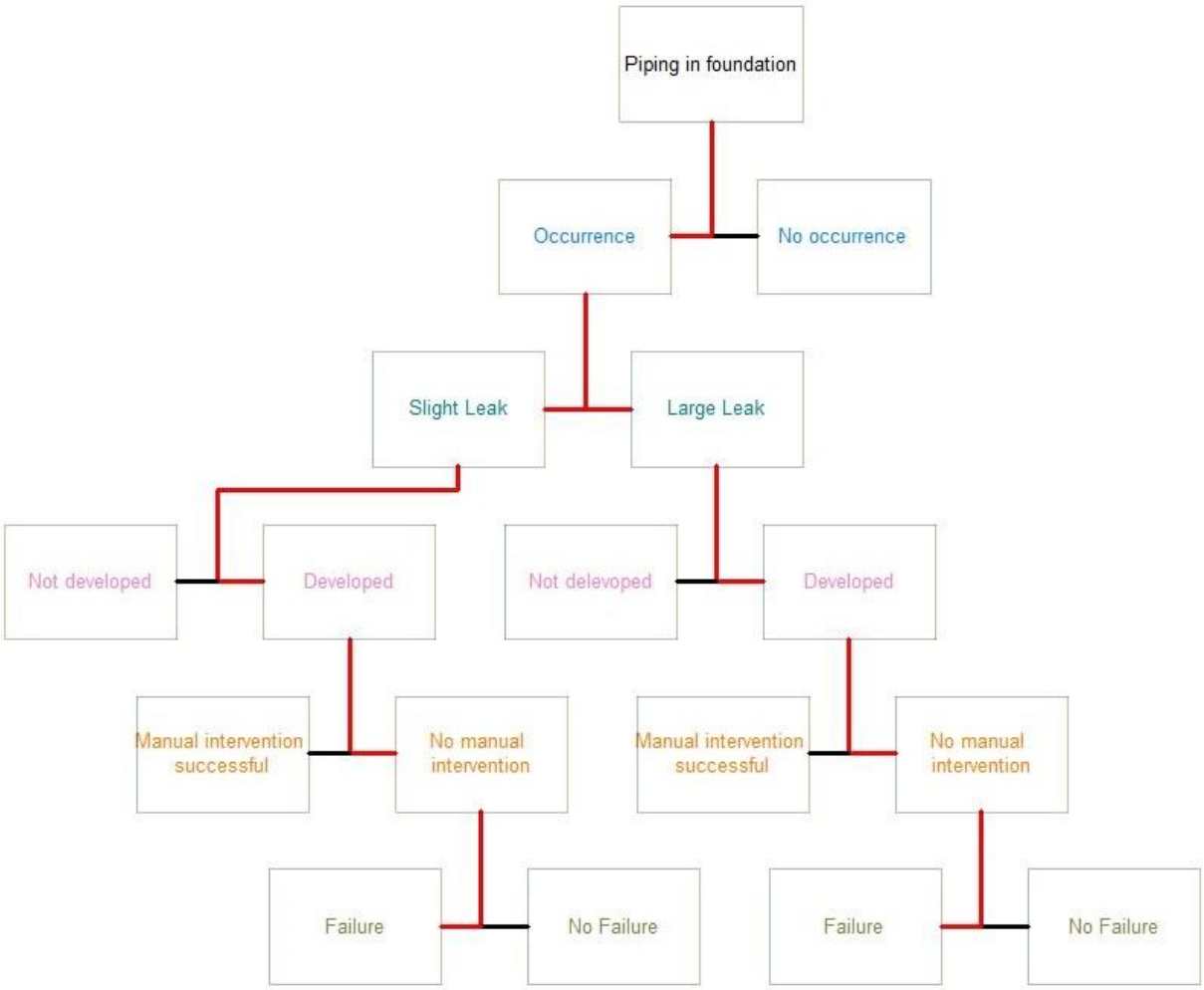


Figura 202 - ETA per Piping in Dam Foundation

7.4.1 Occurrence/No Occurrence

Come anticipato al capitolo precedente, il "Piping in Foundation" (Figura 202) costituisce uno dei fenomeni più rischiosi, sia per la sua natura subdola e spesso di difficile individuazione, sia per l'occorrenza relativa che, pur leggermente inferiore a quella dell'analogo fenomeno sul corpo diga, sfiora il 10% del totale dei casi di incidenti analizzati nel corso del presente studio. Il fenomeno si presenta in maniera analoga, pur coinvolgendo la fondazione al di sotto del corpo diga e di conseguenza mettendo a rischio l'intera opera di invaso (Figura 203).

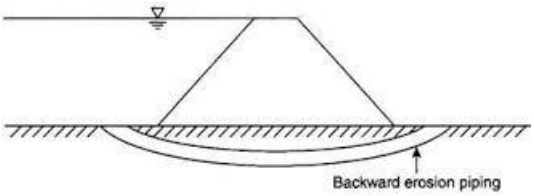


Figure 10.19 Backward erosion piping failure.

Figura 203 - Schema di Piping in Foundation

7.4.2 Slight Leak/Large Leak

L'entità della perdita ricopre tendenzialmente lo stesso ruolo che è già stato presentato al capitolo precedente, in quanto il fenomeno presenta identica natura ma unicamente collocazione differente; quest'ultima induce piuttosto diversi approcci a livello di manutenzione. Va comunque evidenziata che una delle criticità connesse al piping è la sua individuazione nelle fasi preliminari del processo erosivo, quando tra l'altro sarebbe più semplice intervenire per arrestare o contenere il fenomeno; di conseguenza, paradossalmente, la presenza di una perdita di dimensioni contenute potrebbe passare più inosservata e indurre una minore efficacia della successiva opera di contenimento.

7.4.3 Not Developed/Developed

Analogamente a quanto specificato in precedenza, a variare è unicamente lo sviluppo logistico del percorso di filtrazione, che tende a nascere sempre all'interno del corpo diga (in corrispondenza del paramento interno), per poi evolvere verso il piede dell'opera attraversando lo strato sottostante (Figura 204). Da ciò consegue naturalmente un peso diverso nell'economia dell'ETA, visto che tendenzialmente le fondazioni sono realizzate con materiale non combaciante con quello impiegato in superficie (e con un maggiore grado di compattazione, sia imposta che indotta dal carico della struttura stessa).

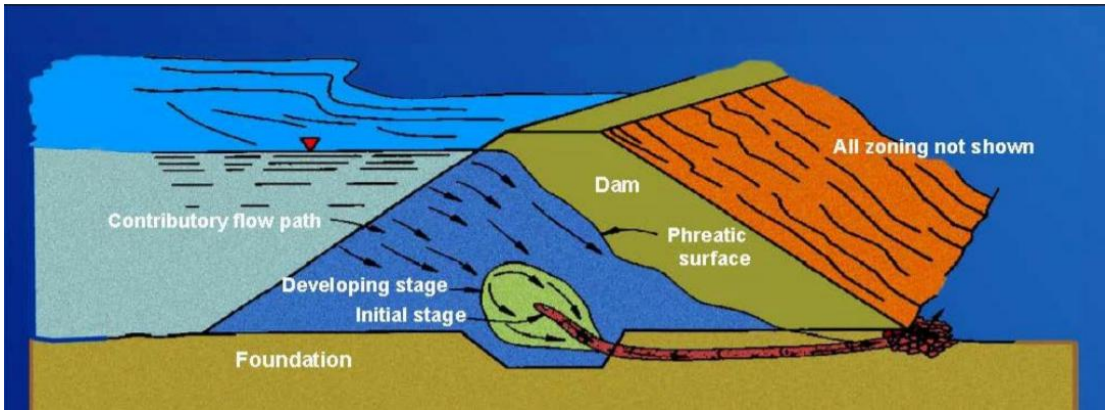


Figura 204 - Ricostruzione grafica del percorso di filtrazione in fondazione

7.4.4 Manual Intervention Successful/No Manual Intervention

In aggiunta al drenaggio concepito al capitolo precedente, il cui obiettivo resta quello di abbassare la curva piezometrica all'interno del corpo diga, inducendo un abbassamento sufficiente a impedire la formazione di risorgive. Nell'ambito della filtrazione in fondazione è inoltre possibile fare ricorso all'aumento del carico stabilizzante sul paramento di valle, anche banalmente attraverso la sovrapposizione di sacchi di sabbia che collaborino a consolidare l'opera malgrado le debolezze indotte dal moto di filtrazione (Figura 205)

Figura 205 - Formazione di sacchi di sabbia in presenza di un fontanale ai piedi di uno sbarramento in terra

7.4.5 Failure/No Failure

Vista la criticità strutturale delle fondazioni rispetto al resto dell'opera, il crollo del paramento appare maggiormente inevitabile rispetto al caso precedente, pur se sempre subordinato al percorso seguito finora, e in particolare alla larghezza del canale di filtrazione (una Large Leak tende a diventare incontrollabile in fretta, vedasi Figura 206)

Figura 206 - Large leak in fondazione in un modello fisico di una diga in terra

7.5 Sliding in Dam Body (Quality Issues)

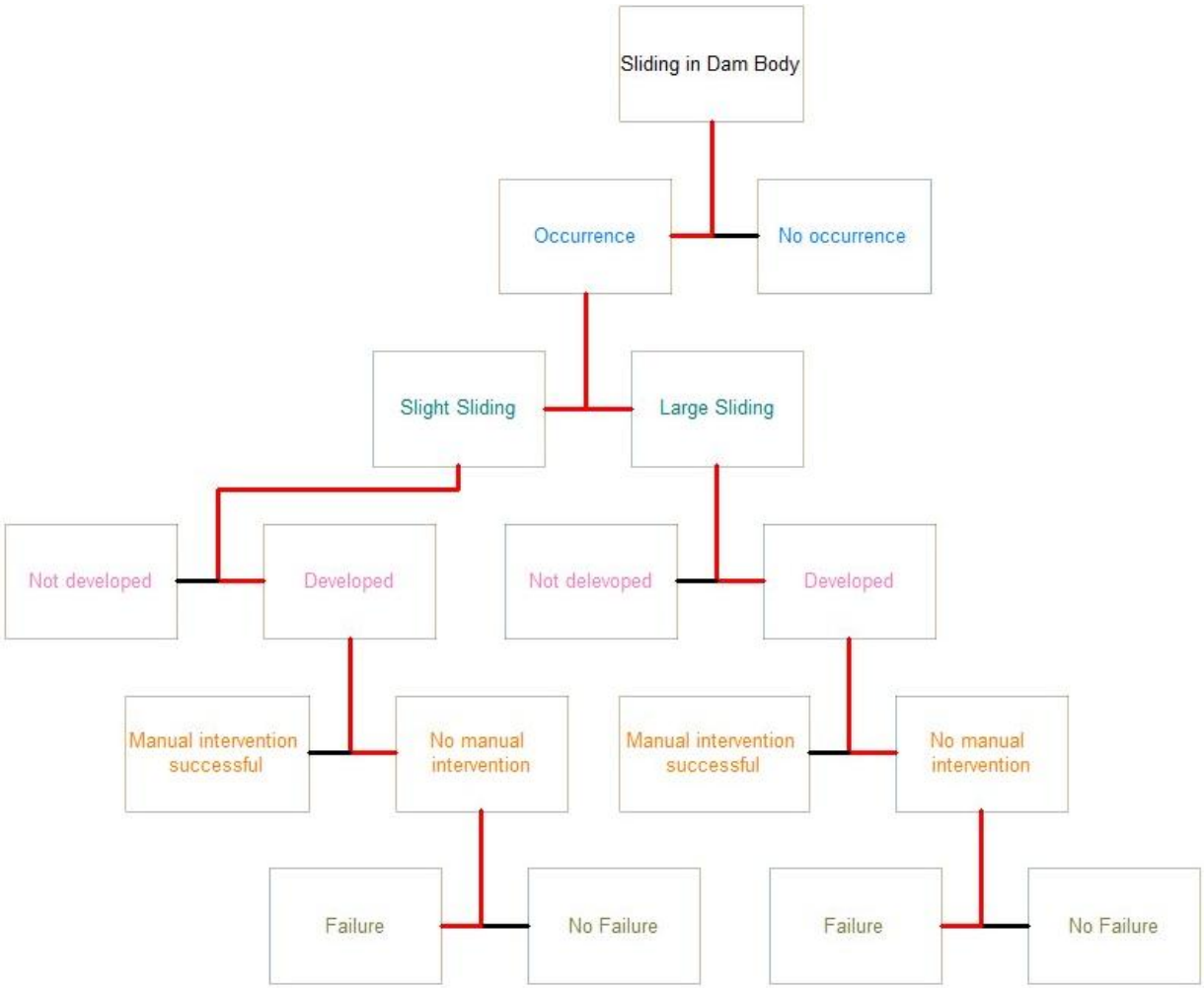


Figura 207 - ETA per Sliding in Dam Body

7.5.1 Occurrence/No Occurrence

La frequenza relativa associata al rischio di scivolamento del corpo diga (Figura 207) rimane piuttosto contenuta, dell'ordine del 3% (all'interno del database creato appositamente per studiare il panorama mondiale di incidenti in ambito di dighe e sbarramenti). L'occorrenza minore rispetto ai casi di Piping è da imputarsi in particolare al fatto che si tratta di un fenomeno maggiormente evidente e che può essere anticipato e contenuto previa analisi geofisica del sito. Va tuttavia ricordato che le dighe, come altri tipi di strutture massicce, possono andare incontro a fenomeni di movimenti differenziali del terreno distribuiti nel tempo e che quindi il monitoraggio deve proseguire necessariamente anche dopo il completamento del bacino (Figura 208).

Figura 208 - Scivolamento al piede di una diga in terra

7.5.2 Slight Sliding/Large Sliding

Analogamente al caso della formazione di brecce all'interno del corpo diga, in seguito a Piping, si rende necessario valutare almeno qualitativamente l'entità dello scivolamento che coinvolge l'opera; ciò non significa che il danno possa essere evitato con certezza in presenza di scivolamenti contenuti (in quanto potrebbero comunque originarsi fenomeni secondari di filtrazione o comunque legati all'indebolimento strutturale dell'opera), ma che il distacco di ampie porzioni di paramento diventa difficilmente gestibile anche sulla base dei potenziali interventi di intervento da parte del gestore dell'invaso, soprattutto se in condizioni di emergenza. Anche in questo caso, converrebbe fissare una soglia definita da un valore fisico (ad esempio la volumetria di materiale coinvolto dal distacco) per passare da una trattazione qualitativa, come la presente, alla quantificazione della probabilità di occorrenza relativa tra i due snodi (Figura 209)

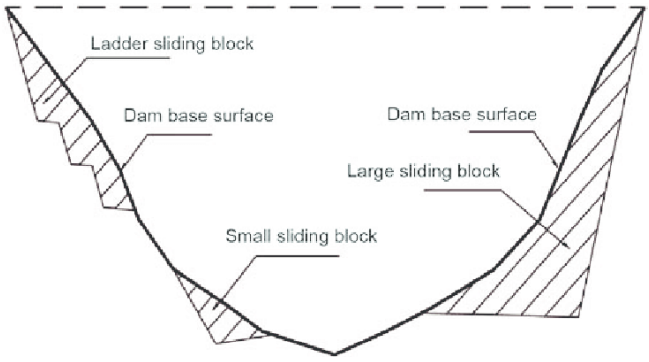


Figura 209 - Fenomeno di sliding alla base di una diga ad arco, schema

7.5.3 Developed/Not developed

Lo scivolamento assume potenzialità distruttive soltanto nel momento in cui lo spostamento relativo tra gli elementi assume un'entità tale da pregiudicare la stabilità strutturale, oppure quando viene meno l'impermeabilità del paramento di valle. Di conseguenza, esistono soglie entro le quali il rischio per l'opera rimane così basso da essere considerato trascurabile (e per questo motivo si interrompe l'albero di evento in corrispondenza di "Not developed").

7.5.4 Manual Intervention Successful/No Manual Intervention

Contrariamente al Piping, lo Sliding del corpo diga resta un fenomeno dal decorso relativo dilazionato del tempo, e in quanto tale consente un intervento più efficace e con largo anticipo rispetto all'insorgenza di criticità disastrose. In particolare, è possibile applicare tutti i metodi geotecnici che caratterizzano la messa in sicurezza dei pendi in fase di incipiente scivolamento, nel dettaglio[196]:

- Interventi di drenaggio per ridurre la spinta idrostatica data dalla pressione interstiziale (trincee, gallerie, pozzi, dreni) (Figura 210)

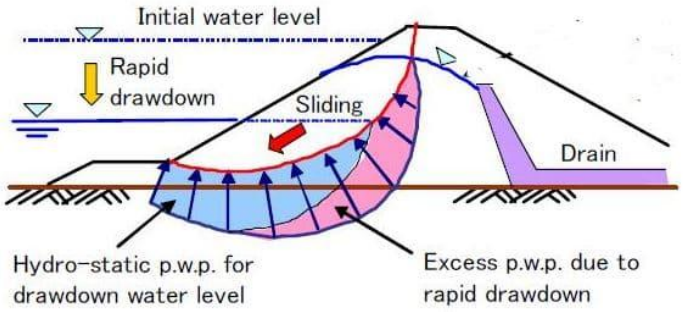


Figura 210 - Effetto del drenaggio su una diga in terra

- Rinterri al piede, per contrastare il meccanismo di scivolamento del pendio (Figura 211)

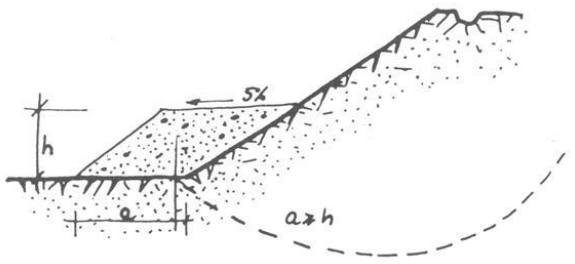


Figura 211 - Effetto stabilizzante del rinterro al piede di un paramento in terra

- Trattamenti di consolidamento (Jet grouting, compattazione ,vibro flottazione, ecc…) (Figura 212)

[196] Weaver, «Dam foundation grouting»

Trattamenti di consolidamento	*Metodi*
Miglioramento meccanico	Vibroflottazione
	Compattazione dinamica
Miglioramento con modifiche fisiche e chimiche	Jet-grouting
	Iniezioni
	Stabilizzazione termica
Miglioramento idraulico	Trattamento elettro-osmotico

Figura 212 - Metodi di consolidamento contro lo scivolamento di paramenti in terra, suddivisi per tipologia

- Strutture di sostengo concepite appositamente per contrastare lo scivolamento in ambito geotecnico (Figura 213):

STRUTTURE DI SOSTEGNO (C)		ROCCIA		TERRA		DETRITO
		SCIVOLAMENTI	CROLLI	SCIVOLAMENTI	COLATE LENTE	COLATE RAPIDE
STRUTTURE A GRAVITA' (C1)	Muri in muratura (C1a)			X		
	Muri in calcestruzzo (C1b)			X		
	Gabbionate (C1c)			X		
	Muri cellulari (C1d)			X		
STRUTTURE IN CEMENTO ARMATO (C2)	Muri a mensola (C2a)			X		
	Muri a contrafforte (C2b)			X		
STRUTTURE SPECIALI (C3)	Paratie (C3a)			X		
	Palificate (C3b)			X		
	Muri tirantati (C3c)			X		

Figura 213 - Schema che mette in luce la predisposizione di determinati interventi a gestire lo scivolamento

La classificazione non vuole essere esaustiva, ma semplicemente evidenziare come l'intervento umano possa minimizzare il rischio di scivolamento anche per quanto riguarda dighe e sbarramenti. Di conseguenza, il presente nodo dell'albero di eventi risulta particolarmente strategico: non soltanto c'è la possibilità tangibile di interrompere il percorso di incidente, ma l'assenza di precauzioni come quelle sopra elencate aumenta notevolmente il rischio di crollo al punto successivo.

7.5.5 Failure/No Failure

Nel momento in cui non si riesce a provvedere ad interventi al piede dell'opera (sia attraverso un rinforzo strutturale che andando ad abbassare l'altezza di falda freatica per ridurre lo sforzo di taglio sul pendio, Figura 214), il rischio di crollo in seguito a scivolamento assume valori notevoli

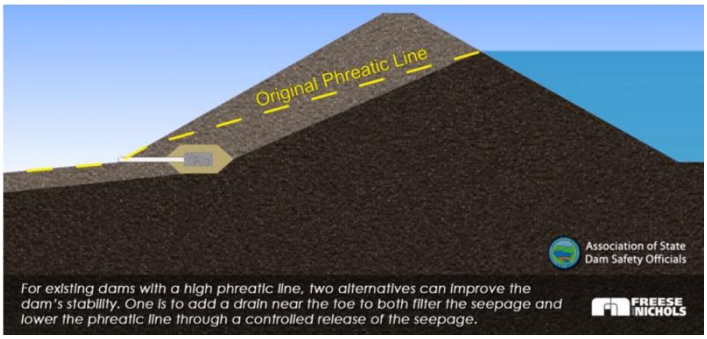


Figura 214 - Ricostruzione grafica dell'abbassamento della piezometrica in un corpoi diga tramite impiego di dreni

7.6 Esempio del calcolo della probabilità di occorrenza tramite ETA

7.6.1 Le ragioni della scelta dell'Extreme Flood per dighe in terra

Una volta affrontato il tema dell'Event Tree Analysis dal punto di vista teorico e qualitativo, si provvede a sondare la possibilità di integrare tale soluzione al fine di ottenere una stima numerica della probabilità di occorrenza di una determinata combinazione di causa d'incidente e di tipologia strutturale[197]. Questo passaggio apparentemente semplice pone invece tutta una serie di criticità, connesse principalmente alla disponibilità e all'accessibilità dei dati. In particolar modo, si sottolinea:

- La limitatezza relativa del campione a disposizione in materia di incidenti. Un'adeguata analisi statistica richiederebbe perlomeno la presenza di alcune migliaia di casi documentati per ogni combinazione, cosa che risulta chiaramente impossibile dal momento in cui si va a constatare che perfino la tipologia più rappresentata (ovvero l'Overtopping per Extreme Flood) fatica a superare i 700 record su una decina di tipologie strutturali diversi. A questo proposito, sarà proprio l'Extreme Flood ad essere scelto per lo studio quantitativo, limitatamente alle dighe in terra che costituiscono la quota maggiore all'interno della banca dati
- Anche quando sono disponibili dati in quantità almeno discreta, il rischio successivo riguarda la possibilità di approfondire le dinamiche di evento: non è raro rintracciare casi di incidente di cui sono note tutte o quasi le variabili tradizionalmente prese in considerazione (età, luogo, altezza, volume invaso, ecc…) ma la cui descrizione dell'evento è condensata unicamente in una manciata di parole che consente sì di collocare il record all'interno della categorizzazione razionalizzata illustrata in precedenza, ma impedisce qualsiasi tentativo di mappare il path di incidente. In alcune situazioni è stato possibile implementare dati provenienti da altre fonti (ad esempio articoli di giornale) al fine di aumentare il grado di dettaglio del decorso dell'incidente, ma nella maggior parte dei casi si è stati costretti a fare affidamento esclusivamente sulla documentazione NPDP, che si è dimostrata esaustiva per poco più di un centinaio di casi di Overtopping per dighe in terra, il campione definitivo.
- Al di là della difficoltà di reperire una robusta base campionaria, l'ultima criticità è da ricercare nella necessità di definire in maniera univoca il path di incidente e, soprattutto, determinare il passaggio attraverso i vari bivi. Se questo è immediato, ad esempio, quando si parla di "Occurrence/No Occurrence", lo stesso non si può dire di biforcazioni la cui distinzione non può dirsi altrettanto netta (quale potrebbe essere la differenza, in termini metrici, tra un semplice fenomeno erosivo e una vera e propria breccia? Oppure, se l'allarme viene dato ma estremamente in ritardo e senza ricadute effettive sul contenimento della probabilità di collasso, è lecito attribuire la direzione "Alarm" al path?). E' quindi necessario, di volta in volta, assegnare il percorso di evento nella direzione ritenuta più affine alla definizione fornita, senza per questo avere la pretesa di totale correttezza e ammettendo l'esistenza di una zona grigia da categorizzare obbligatoriamente.

[197] Clemens, «Event tree Analysis»

7.6.2 L'ETA di riferimento e la presentazione dei dati

Nell'ottica di modellizzare un esempio di calcolo pratico di ETA, si è fatto riferimento alla combinazione che presenta il maggior numero di record, ovvero Diga in Terra x Extreme Flood (Overtopping), per un totale di circa 700 casi documentati. All'interno di questo numero già di per sé limitato, si è rivelato necessario restringere il campione per risalire agli eventi di cui fosse possibile ricostruire il path di incidente, sia attraverso le informazioni fornite direttamente dai database e dalle pubblicazioni consultate, sia in seguito ad approfondimenti specifici. Sono stati esclusi sia i casi che presentavano unicamente la tipologia di incidente, sia quelli che avrebbero teoricamente permesso un'analisi più approfondita ma senza la possibilità di categorizzare adeguatamente i vari bivi. Sulla base di queste ipotesi, si è pervenuto alla definizione di 119 record univoci e per cui si è realizzato il seguente layout (Figura 215):

Causa razionalizzata generica	Occurrence	Alarm/No Alarm	Contenimento/No contenimento	Erosione/Breccia	Failure/No Failure
Overtopping	Yes	No Alarm	Contenimento	No	No Failure
Overtopping	Yes	No Alarm	No contenimento	Erosione	Failure
Overtopping	Yes	Alarm	Contenimento	No	No Failure
Overtopping	Yes	Alarm	Contenimento	No	No Failure
Overtopping	Yes	Alarm	Contenimento	No	No Failure
Overtopping	Yes	Alarm	Contenimento	No	No Failure
Overtopping	Yes	Alarm	Contenimento	No	No Failure
Overtopping	Yes	Not Alarm	Contenimento	No	Failure
Overtopping	Yes	Alarm	Contenimento	No	No Failure
Overtopping	Yes	Alarm	Contenimento	No	No Failure
Overtopping	Yes	No Alarm	No contenimento	Breccia	Failure
Overtopping	Yes	No Alarm	Contenimento	No	No Failure
Overtopping	Yes	Alarm	Contenimento	No	No Failure
Overtopping	Yes	Alarm	Contenimento	No	No Failure
Overtopping	Yes	Alarm	Contenimento	No	No Failure
Overtopping	Yes	Alarm	Contenimento	No	No Failure
Overtopping	Yes	Not Alarm	Contenimento	No	Failure
Overtopping	Yes	Alarm	Contenimento	No	No Failure
Overtopping	Yes	No Alarm	Contenimento	No	Failure
Overtopping	Yes	Alarm	Contenimento	No	No Failure

Figura 215 - Tabella per il calcolo dell'occorrenza statistica dei diversi path di incidente

Nello specifico, ad ogni evento è stata associata una colonna per ogni bivio, all'interno del quale indicare la direzione del flusso dell'ETA per quel preciso incidente. Ad esempio, se si è registrato l'avvenuta comunicazione di una qualche forma di allerta dell'aumento del livello idrico, nella colonna Alarm/No Alarm è stato assegnato il valore Alarm. Una volta determinate le caratteristiche di ogni record, si è costruita una tabella contenente i quattro diversi path di incidente che portano effettivamente a collasso della struttura di invaso (Tabella 68):

Casi totali	119										
Occurrence	0.23%										
Alarm	85	71.43%	No Contenimento	11	12.94%	Erosione	7	81.82%	Failure	2	28.57%
Alarm	85	71.43%	No Contenimento	11	12.94%	Breccia	2	18.18%	Failure	1	50.00%
No Alarm	24	28.57%	No Contenimento	10	41.67%	Erosione	6	60.00%	Failure	4	66.67%
No Alarm	24	28.57%	No Contenimento	10	41.67%	Breccia	4	40.00%	Failure	3	75.00%

Tabella 68 - Suddivisione dei path di incidente

Si procederà ora con l'illustrazione nel dettaglio dei dati estrapolati dal database al fine di determinare la probabilità di occorrenza di Overtopping per Extreme Flood nelle dighe in terra.

7.6.3 Occurrence/No Occurrence

S'intende che il valore di occorrenza relativa di questa tipologia di incidente sarà un valore quanto mai approssimato, vista l'origine non assolutamente robusta dei dati, sia per quanto riguarda gli incidenti che la popolazione di dighe. Assumendo comunque un campione di 700 incidenti e un insieme universi di circa 300 000 invasi, si perviene ad una percentuale tutto sommato realistica e pari a 0,23% (ovvero circa una diga su 400) (Figura 216).

Figura 216 - Occurrence/No Occurrence

7.6.4 Alarm/No Alarm

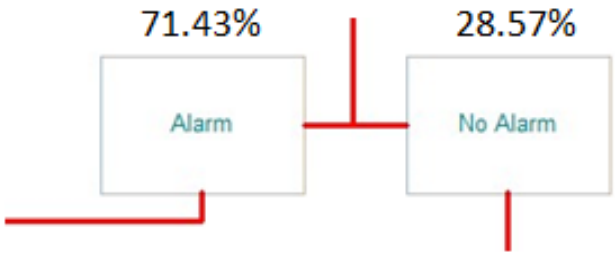


Figura 217 - Alarm/No Alarm

Sui 119 casi esaminati, ben 85 sono stati caratterizzati da un tentativo sufficientemente efficace di comunicare per tempo l'arrivo di un'onda di piena (Figura 217); naturalmente, come già specificato nell'introduzione, risulta complicato esprimere un giudizio definitivo su tutta una serie di variabili che presentano al contrario un andamento "a scala di grigi" con notevoli sfumature intermedie. Si è comunque valutato come "Alarm" ogni evento in cui l'allerta sortisse un qualche effetto positivo per le successive operazioni di contenimento. Il path di "Alarm" naturalmente non presuppone una percentuale nulla di collasso, ma è lecito attendersi che il successivo bivio relativo all'efficacia delle misure intraprese possa essere sensibilmente sbilanciato verso la mancanza di conseguenze

dannose. In ogni caso, il 71,43% dei casi percorre il path “Alarm”, mentre la quota complementare (nello specifico 28,57%) passa attraverso “No Alarm” verso conseguenze sicuramente più critiche.

7.6.5 Containment/No Containment

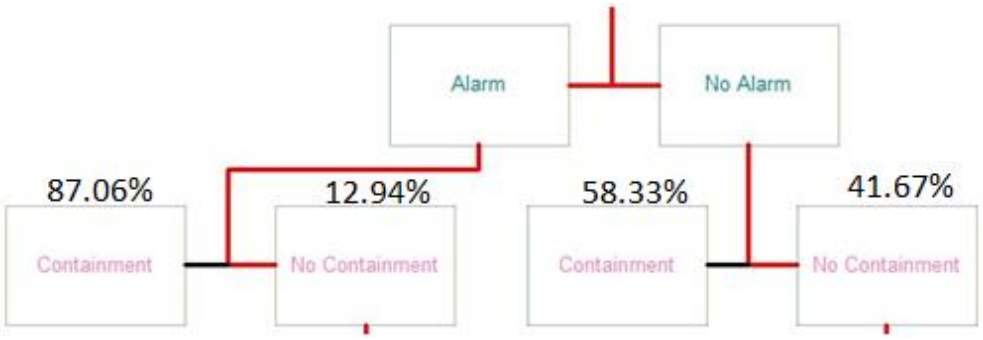


Figura 218 - Containment/No Containment

Il bivio successivo presenta il primo binario morto, in corrispondenza dell’evenienza “Containment” (Figura 218): si presume, in sostanza, che agendo per tempo (ad esempio attraverso uno svuotamento preventivo del bacino), le possibilità di collasso tendano rapidamente a zero (anche in questo caso un’approssimazione semplificativa, ma tendenzialmente affidabile) fino a risultare trascurabili. Ci si attende, naturalmente, una percentuale di “Containment” maggiore sul path “Alarm” piuttosto che su quello “No Alarm”: effettivamente, nel primo caso si registra una percentuale dell’87,06%, mentre nel secondo soltanto 58,33%. Questo perché una reazione rapida presuppone tendenzialmente interventi che vengano messi in atto ben prima dell’inizio del fenomeno critico. Non essendoci prosecuzione del path attraverso “Containment”, quello che interessa realmente è la percentuale di No Containment, complementare a quelle indicate sopra e pari, nello specifico, rispettivamente a 12,94% e 41,67%.

7.6.6 Erosion/Breach

Figura 219 - Erosion/Breach

Nel caso di impossibilità di contenere l'onda di piena, si è assunto che si verifichi un fenomeno erosivo a prescindere (eventuali casi di mancato sviluppo dell'erosione vengono computati direttamente in "Containment", per quanto in maniera impropria). L'entità di tale fenomeno è stata valutata, come di consueto, tra due categorie opposte: un semplice canale erosivo oppure una vera e propria breccia (Figura 219). Anche in questo caso vengono rispettate le aspettative, in quanto l'"Erosion" derivante dal percorso "Alarm" tocca quota 81,82%, mentre l'analogo path transitante per "No Alarm" si ferma al 60%. Non è una sorpresa che l'allerta possa aiutare non soltanto a contenere la piena, ma, una volta appurato il contenimento non sufficiente, consenta di agire per ridurre l'entità della filtrazione. La quota di "Breach", ovviamente, è il complemento a cento dei valori sopra indicati, e si mantiene sempre al di sotto del 50%, in linea con le informazioni accessorie di cui si dispone.

7.6.7 Failure/No Failure

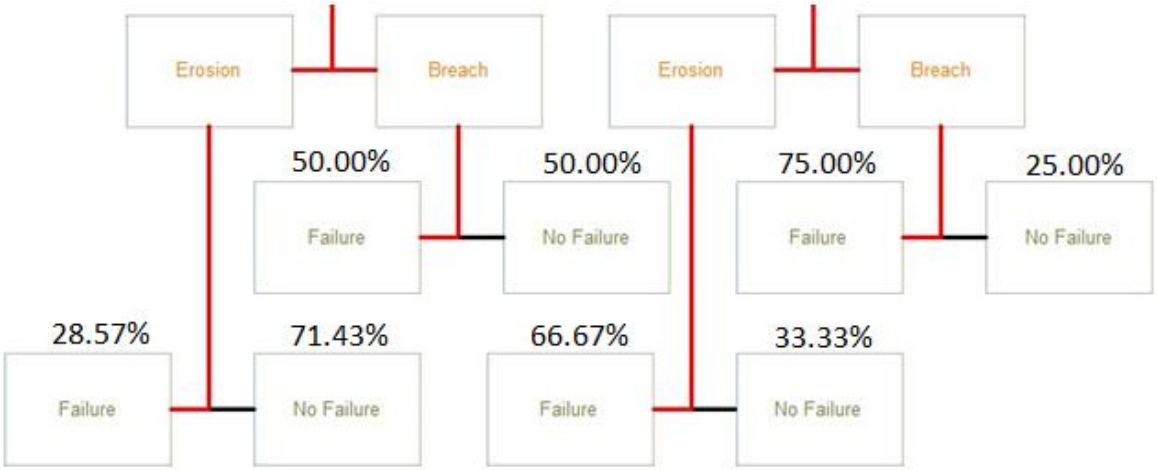


Figura 220 - Failure/No Failure

Si arriva infine al termine dell'albero di evento, cui corrispondono quattro alternative di "Failure" (in quanto, s'intende, il verificarsi del fenomeno erosivo, anche sotto forma di una ampia breccia, non induce automaticamente il collasso). Le percentuali di collasso appaiono leggermente minori per i path che passano attraverso "Erosion" rispetto a "Breach" (Figura 220); inoltre, sempre in accordo con le attese, aumenta il rischio di collasso nel path passante per "No Alarm".

7.6.8 Risultato finale

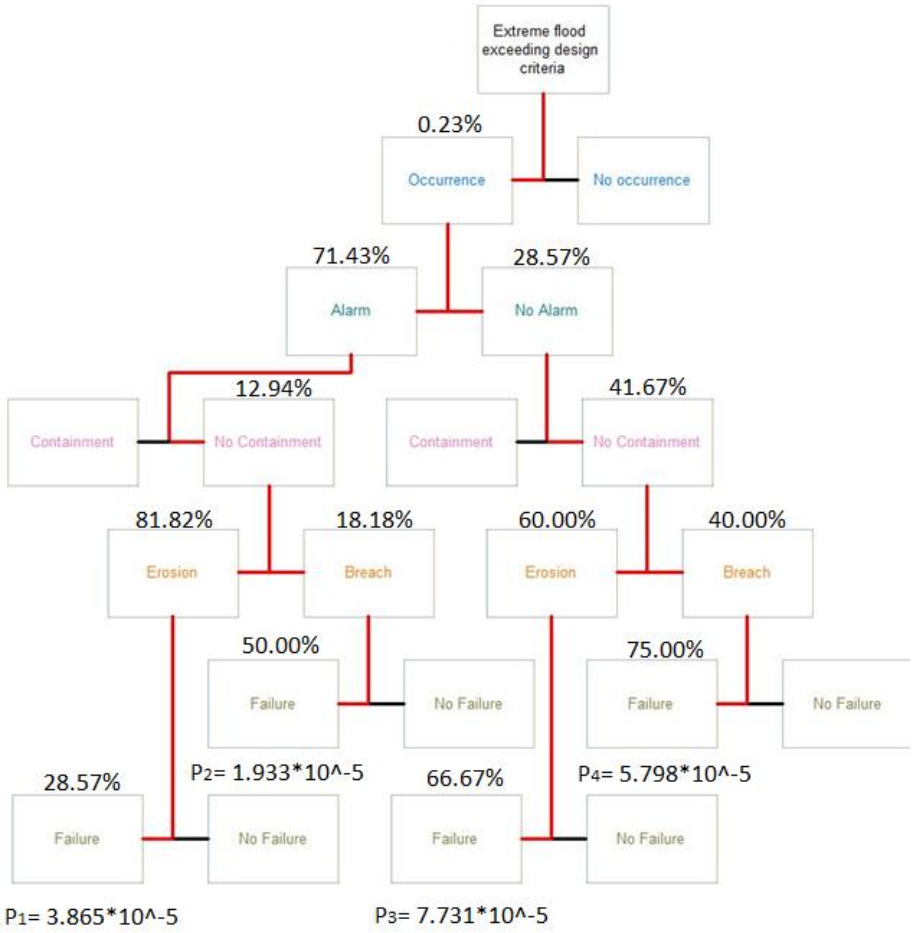


Figura 221 - Determinazione percentuale collass

Alarm	No Contenimento	Erosione	Failure	3.86555E-05
Alarm	No Contenimento	Breccia	Failure	1.93277E-05
No Alarm	No Contenimento	Erosione	Failure	7.73109E-05
No Alarm	No Contenimento	Breccia	Failure	5.79832E-05
			TOTALE	1.93E-04

Tabella 69 - Calcolo probabilità di collasso complessiva

I risultati finali fotografano una realtà leggermente singolare (Figura 221): la probabilità di collasso per l'"Erosion" rimane costantemente superiore all'equivalente "Breach": questo perché, benché la probabilità relativa alla breccia sia naturalmente maggiore, l'occorrenza relativa del fenomeno erosivo più intenso, piuttosto bassa, compensa ampiamente. La probabilità complessiva, 1,93*10^-4, è dell'ordine di grandezza atteso, anche se risulta superiore al limite di 10^-4 tendenzialmente preso in considerazione in fase progettuale (Tabella 69). Va tuttavia sottolineato l'inevitabile bias dei dati e, inoltre, che l'analisi verte su dighe diffuse in tutto il mondo (quindi anche in zone caratterizzate da una diversa cultura della sicurezza) e appartenenti ad epoche antecedenti alle attuali normative.

8 CONCLUSIONI FINALI

8.1 Analisi statistica dighe

L'analisi svolta a più riprese all'interno della presente tesi ha permesso di individuare una profonda dicotomia tra la mappatura a livello mondiale del patrimonio di grandi dighe e quello delle piccole. In particolare, è emerso chiaramente come l'opera di registrazione delle prime sia stata gestita in maniera molto dettaglia da ICOLD nel corso degli ultimi cinquant'anni, arrivando sia a realizzare un database approfondito e facilmente accessibile, sia in parallelo a curare la redazione di più di un centinaio di bollettini, pubblicazioni scientifiche e articoli a carattere tecnico. Al contrario, manca un equivalente affidabile che posso occuparsi degli invasi più piccoli, che paradossalmente richiederebbero un focus maggiore per fare fronte alla loro elevatissima numerosità e alla difficoltà intrinseca di ottenere informazioni in maniera autonoma riguardo ai singoli bacini; non è infatti cosi improbabile che le dighe maggiori possano contare su schede tecniche all'interno dei siti internet delle compagnie che ne sfruttano l'invaso, cosa che ovviamente non potrebbe avvenire per la miriade di piccole dighe che popola il pianeta. Questo non significa comunque che non siano presenti database in merito, ma nella maggior parte dei casi conservano un carattere locale: un esempio è dato dal FEMA, una banca dati di competenza del Dipartimento della Difesa statunitense, che fotografa unicamente la situazione nazionale, pur offrendo tutta una serie di strumenti per infittire il dettaglio dell'analisi. L'unica possibilità percorribile consiste nel fare riferimento ai dati messi a disposizione da NPDP, che a livello teorico raccoglie record di dighe (e in particolar modo di incidenti) da tutto il mondo. Il problema è legato alla distribuzione geografica: più del 90% del database è collocato entro i confini degli USA e la quota restante, naturalmente molto contenuta, è suddivisa non in maniera proporzionale alla reale presenza di dighe, bensì secondo criteri geo-politici. Inoltre, un'altra differenza sostanziale tra ICOLD e NPDP riguarda la categorizzazione delle stesse proprietà: non vi è una suddivisione univoca, per quanto le voci più diffuse tendano ad avere una denominazione comune. L'opera di unificazione dei due database (NPDP e ICOLD, rispettivamente per quanto riguarda le piccole dighe e le grandi dighe) ha quindi imposto alcune sfide cruciali:

- Istituire una convenzione condivisa per ogni variabile presa in considerazione: tale operazione si è rivelata la più semplice, in quanto esisteva già un sostanziale parallelismo. Si è provveduto unicamente a condensare alcune sottocategorie per fare riferimento ad una suddivisione meno fitta ma capace di mostrarsi robusta in ogni settore del database
- Risolvere il bias territoriale del database NPDP: sulla base di pochi punti fermi (la numerosità di grandi dighe ICOLD, la quota di piccole dighe documentare sul territorio Statunitense e la rappresentatività stimata degli altri record): nell'ottica di assemblare un unico database tramite il quale approfondire il confronto con la banca dati degli incidenti, si è ricalibrato il database NPDP (limitatamente alle Small Dams) accettando alcune approssimazioni e partendo da assunzioni matematiche ritenute valide unicamente per il livello di dettaglio del presente studio. Il risultato finale porta alla stima di circa 300 000 dighe totali a livello mondiale, compatibile i valori ipotizzati da numerose pubblicazioni; inoltre, le distribuzioni interne al database appaiono prive di deviazioni significative.

Nel complesso, si è realizzato come l'interesse della Comunità Scientifica verta attualmente i maniera privilegiata sugli invasi maggiori; questo perché, in primo luogo, le grandi dighe risultano

generalmente più documentate a causa della necessità, anche all'interno dei Paesi meno sviluppati, di dialogare direttamente con le Istituzioni per la loro realizzazione, con conseguente e obbligatoria comunicazione di tutta una serie di informazioni sensibili. Inoltre, è decisamente più raro che una diga di altezza superiore ai 15 metri possa avere un carattere così locale da risultare di difficile studio dagli esperti del settore. Lo stesso sfortunatamente non si può dire per le dighe più piccole, che talvolta vengono erette senza rientrare nella sfera di conoscenza delle grandi banche dati, pur presentando ugualmente rischi connessi alla loro attività, non minori delle Large Dams. Al fine di migliorare la qualità della progettazione e diminuire le incertezze legate alla sicurezza, un primo passo strategico dovrebbe essere, in conclusione, la mappatura più dettagliata della popolazione di piccole dighe.

8.2 Analisi statistica incidenti

La costruzione della banca dati relativa ai soli incidenti ha costituito la sezione nevralgica della tesi, frutto di un lavoro molto lungo e approfondito di reperimento di un campione statisticamente robusto di dati connessi a dighe che sono andate incontro a malfunzionamenti più o meno catastrofici. Anche in questo caso la criticità maggiore non è da ricercare nell'individuazione dei dati, in quanto al contrario le informazioni disponibili in rete appaiono piuttosto circoscritte; il problema riguarda piuttosto la qualità degli stessi, che oscilla notevolmente a seconda della fonte di origine. In aggiunta, alcune banche dati si distinguono per la numerosità dei record a disposizione, in particolar modo NPDP, che non a caso si è rivelato lo strumento maggiormente impiegato nell'ambito del presente studio; pur presentando numerose voci incomplete e un'interfaccia di accesso poco user-friendly (in particolar modo quando si tratta di manipolare un gran numero di informazioni e di correlare tra loro), essa ospita circa 3000 casi documentati di incidenti adeguatamente distribuiti a livello geografico, tipologico e per le variabili "ingegneristiche" (altezza, bacino, ecc…). Si tratta tuttavia di record appartenenti in modo pressoché esclusivo agli Stati Uniti, cosa che induce un inevitabile bias territoriali, simile a quello osservato per le Small Dams; fortunatamente, l'estensione notevole degli USA e la loro natura federale, quindi caratterizzata da differenze pronunciate tra una zona e l'altra, favorisce una distribuzione comunque eterogenea e sufficientemente rappresentativa anche del panorama mondiale. Gli altri database che si sono dimostrati affidabili su scala medio-ampia sono stati ARIA e le pubblicazioni prodotte da enti governativi inglesi. Nel complesso, è stato raggiunto un significativo grado di dettaglio, grazie anche a controlli incrociati e ad approfondimenti caso per caso, al fine di massimizzare il numero di informazioni reperibili e aggiungere parametri di valutazione della sensibilità agli incidenti, quali ad esempio l'età della struttura (desunta attraverso ricerche sull'anno di costruzione) e il verificarsi o meno del superamento dello Stato Limite di Crollo. Le criticità maggiori sono emerse nell'ambito della definizione univoca di Altezza e in particolar modo del Volume di Invaso, due caratteristiche tecniche che al contrario rivestirebbero un'importanza fondamentale nella valutazione delle modalità di incidente.

9 FONTI

9.1 Bibliografia

- A.J. Yarde, L.S. Banyard, N.W.H. Allspo "Reservoir dams: wave conditions, wave overtopping and slab protection"
- Ajibade, «Seepage Problems in Dams»
- Akidoye, «Dams: Providing and Destroying Water Security?»
- Alexander Shannon, «THE ECONOMICS OF DAM SECURITY POST 9/11 AND THE THREAT TO CONSUMER CONFIDENCE»
- Alhasan, Jandora, e Říha, «Study of Dam-Break Due to Overtopping of Four Small Dams in the Czech Republic».
- Alonso e Cardoso, «Behavior of materials for earth and rockfill dams » (2010).
- Altinbilek, «The Role of Dams in Development»
- Amaral, « FAILURE BY OVERTOPPING OF EARTH DAMS. QUANTIFICATION OF THE DISCHARGE HYDROGRAPH»
- ANCOLD, «Consequence Screening Tool for Small Dams»
- ANCOLD, «Queensland Dam Safety Management Guidelines»
- Anderson, Jenkins, Heilpern et al. «Fragmentation of Andes-to-Amazon connectivity by hydropower dams»
- Ansar et al., «Should We Build More Large Dams?»
- ARIA, «Release of 50 million m3 of water at the Vajont Dam»
- Asian Development Bank, «Dam Optimization»
- Aurada e Rödel, «2.6 Dams – structures and functions – on a global .pdf».
- Australian Water Commission, «Large Dams Fact Sheet»
- BARPI, «Inventaire des accidents survenus en 2015»
- Bautista, DeRosa, «Agriculture and the New Industrial Revolution in Asia».
- Billington, Jackson, Melosi, «The history of Large Federal Dams: Planning, Design and Construction »
- Billington, Jackson, e Melosi, «THE HISTORY OF LARGE FEDERAL DAMS: PLANNING, DESIGN, AND CONSTRUCTION IN THE ERA OF BIG DAMS».
- Biswas, «Impacts of Large Dams Issues, Opportunities and Constraints» (2012).
- Bowles, «Approaches to estimating individual risk for dam safety tolerable risk evaluation»
- Brandt et al, «Industrialization in China».
- Bureau of Reclamation – U.S. Department of the Interior "Erosion of Rock and Soil"».
- Bureau of Reclamation «Federal Guidelines for Dam Safety, Earthquake Analysis.pdf».
- Bureau of Reclamation, «Design of Gravity Dams»
- Bureau of Reclamation, «Arch and Buttress Dams»
- Bureau of Reclamation, «History of building the main dams and reservoirs»
- Bureau of Reclamation, «Identifying, Describing, and Classifying Potential Failure Modes»
- Bureau of Reclamation, «Small Dams Design»
- Chen, Lin, «The Total Risk Analysis of Large Dams under Flood Hazards»
- Chuck Anderson, Caroline Mohorovic, Larry Mogck, Bitsy Cohen, Gregg Scott, «Concrete Dams Case Histories of Failures and Nonfailures with Back Calculations».
- Clemens, «Event tree Analysis»
- Cywinski «HYDROPOWER AND THE CANADIAN ECONOMY JOBS».
- Da Costa, «Sustainable Dam Development in Brazil»

- Dam Safety Committee «Dam Security»
- damfailures.org «Lessons Learned from Dam Incidents and Failures»
- DC Technologies, «Dams and its types»
- De Mello, «Present situation of Dam Project in Brazil» (2014).
- Degoutte et al., «Petits barrages recommandations pour la conception» (2002).
- DIMENC, «Le Risque Industriel» (2014)
- Doug Vine, «INTERCONNECTED: CANADIAN AND U.S. ELECTRICITY»
- Duda-Gromada, «USE OF RIVER RESERVOIRS FOR TOURISM AND RECREATION»
- Economic Commission for Europe «Dam Safety in Central Asia»
- Edward A. Ackerman, George O.G. Loff, «Technology in American Water Development»
- Emiroglu, «Influences on Selection of the Type of Dam»
- Environmental Fact Sheet, «Basic Terms of Dam Characteristics »
- EU Life Program «Timber Dams Factsheet»
- Evans, Gill et al. , «Lesson from a dam failure»
- FAO, «Hydric Statitistic on South Korea»
- Fasan et al., «Perché una probabilità di superamento del 10% in 50 anni? Un nuovo approccio alla progettazione sismica».
- Federal Energy Regulatory Commission «Monitoring the Health of Dams»
- Federal Highway Administration (2005)
- FEMA, « Federal Guidelines for Dam Safety: Hazard Potential Classification»
- FEMA, «Guidelines on Acceptable Flood Capacity for Water Dams July 2017».
- Fernandez, Rodriguez, Mendez, «Earth Dam Monitoring in the Soil Take Care Project»
- Flavia Zimmermann, «Brazil's Latest Dam Disaster: Human Loss and Environmental Degradation»
- George, Annandale, «Dam Failure by Rock Scour: Evalulation & Prevention (A Case Study)»
- Ghanbari, «Principles of Earth Dam Engineering»
- Government of Canada, «Positive Effects of Small Dams and Reservoirs»
- Gudgeon, Walbancke, «Design and performance of 19th-century earth dams»
- Guillaume Hennequin «Hydro, Tide and Waves Energy in Japan»
- Hanson et al. 2011
- Hewlett et al. (1987)
- Ho, Lall et al., «The future role of dams in the United States of America»
- Homeland Security, «Dams Sector Security Awareness Guide»
- Huzjak, «SETTLEMENT OF EMBANKMENT DAMS - DON'T FORGET ABOUT THE BEDROCK».
- ICID, «Role of Dams for Irrigation, Drainage and Flood Control».
- ICOLD «Bulletin 137»
- ICOLD, «87th Annual Meeting JUNE 9-14, 2019 — OTTAWA, CANADA INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS»Esther Duflo, Rohini Pande «Dams»
- ICOLD, «Bulletin 99»
- ICOLD, «Constitution of ICOLD (2011) ».
- ICOLD, «Guide to the World Register of Dams »
- ICOLD, «Small Dams, Design, Surveillance and Rehabilitation»
- INCOLD, "Small Dams"
- INCOLD, «Large Dams in India».

- Jandora, Riha, «The failure of embankment dams due to overtopping»
- Japan Dam Foundation, «Dam Technologies of Japan»
- Japan Society of Civil Engineers, «Dam Concrete» (2007)
- JCOLD «Overwiev on Japan Large Dams».
- Jinsheng , «Dam Construction in China»
- Joeren Van Herk, «Dam removal Europe Report»
- John E. Costa "FLOODS FROM DAM FAILURES" (1985)
- Kang, «Hydropower Development in China: History and Narratives».
- Kebede Kassa, «Iran's Nuclear Program»
- Kerachian, «Spillway Capacity Optimization under Hydrologic Uncertainties and Flood Routing»
- Keys, «PREPARING FOR DAM-FAILURE FLOODING»
- Kirchsteiger, "On the use of probabilistic and deterministic methods in risk analysis"
- Kossof, Dubbin, Alfredsson et al. «Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation»
- Kuun, «The construction of Dam sto ensure water security in South Africa»
- Large Dam Database in Greece, «Functions and uses of dams»
- Lehner and al., «High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management»
- Lempérière, «Dams and Floods».
- Lempérière, «Design and Construction of Dams, Reservoirs, and Balancing Lakes»
- Lempérière, «The role of dams in the XXI century Achieving a sustainable development target»
- Lire Ersado, «Small-scale irrigation dams, agricultural production, and health»
- Lubek, Wakeford «The future of Hydroelectric in France»
- Luino, Tosatti, e Bonaria, «Dam Failures in the 20th Century: Nearly 1,000 Avoidable Victims in Italy Alone».
- Magee, «Dams in East Asia: Controlling Water but Creating Problems»
- Mao, Wang et al. «Management System for Dam-Break Hazard Mapping in a Complex Basin Environment»
- Marche, «Embankment dam overtopping and collapse: an innovative approach to predict the breach outflow hydrograph»
- Martin W. McCann, «National Performance of Dams Program An Archive of Dam Information and Experience»
- N van de Giesen, «A brief history of 20th century dam construction and a look into the future»
- New York State Department of Environmental Conservation, «Guidelines for Design of Dams»
- NHCP & NRCS, «NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE»
- Nistor, Rappai, Vanapalli, «Overtopping of earth embankments : Sensitivity analysis of dam breaching»
- NPDP, «Design and Construction of Dams»
- NPDP, «Introduction to NPDP Database»
- NPDP, «NPDP database presentation»
- Oliveira et al., «Monitoring the Structural Integrity of Large Concrete Dams: The Case of Cabril Dam, Portugal».
- Ouamane, «Dam engineering in Algeria: progress, needs and prospects»
- Paarlberg D., Paarlberg P., «The Agricultural Revolution of the 20th Century»

- Penning de Vries e International Water Management Institute, «Integrated land and water management for food and irrigation» (2004).
- Perez , « The Mineral Industry of Spain».
- Pohl, «A German guideline for Small Dams and small Flood Control Reservoir»
- Prinsco, «Pipe through Embankment Dams»
- Prof. B.S. Thandaveswara, «Hydraulics (2014) ».
- Ramesh Chander «Can Dams and Reservoirs Cause Earthquakes? »
- Rolfe, Prayaga, «Estimating Values for Recreational Fishing at Freshwater Dams»
- Scarborough, Sahin, Porter, Stewart, «Long-term water supply planning in an Australian coastal city: Dams or desalination?»
- Shafai, «Individual Project 4 Design Criteria and Failure Modes for Concrete Gravity and Arch Dams»
- Sharma e Kumar «Case Histories of Earthen Dam Failures».
- Shilts, Blake «Rivers of Ice - Canada's Glaciers»
- Shortridge, «Early History of Hydroelectric Power».
- Skinner, Niasse, e Haas, «Sharing the Benefits of Large Dams in West Africa».
- Stephens «Manual on small earth dams » (2010).
- Svensen, «Numerical analyses of concrete buttress dams to design dam monitoring »
- Tate, «Piping Failure of the Poipi Reservoir»
- Temple, Irwin (2006)
- Tom Hepler , Bill Fiedler , Tracy Vermeyen , Bob Dewey , Tony Wahl "OVERTOPPING PROTECTION FOR DAMS – A TECHNICAL MANUAL OVERVIEW"
- Tracey Williamson, «Historic dam failures and recent incidents»
- Türkmen et al., «Effect of Construction Material on Dam Type Select» (2013).
- U.S. Department of the Interior, "Reservoir Debris Management"
- United States Society on Dams e United States, «Modernization and optimization of existing dams an» (2007).
- University of Harvard, «Large Dams in India».
- University of Wisconsin «Large Dams - Human and Environmental Benefits and Costs».
- US Army Corps of Engineers, «Gravity dam design»
- US Army, "Guide to National Inventory of Dams"
- US Army, «General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams »
- Van Damme, «Concrete material science: Past, present, and future innovations»
- Van de Giesen, «A brief history of 20th century dam construction and a look into the future»
- Vine e Kurdish, «The Cultural and Environmental Impact of Large Dams in Turkey» (2004).
- Vitor da Silva, Eduardo Julio, «Design and Analysis of Arch Dams by the Membrane Method»
- Wahl (1998)
- Water Power and Dam Construction, «Large or small - does dam size matter?»
- Watterstein, Thorne, «Debris Control at Hydraulic Structures in Selected Areas of the United States and Europe»
- Weaver, «Dam foundation grouting»
- Wieland, «Life-span of storage dams»
- Wieland, Mueller, «Dam safety, emergency action plans and water alarm systems»
- Wiemer, «Earthquake Statistics and Earthquake Prediction Research».

- Williamson, «Historic Dam Failures and Recent Incidents».
- Wilson, Squier, «Earth and Rockfill Dams».
- World Commission of Dams, «Dams and Development: A New Framework for Decision-Making»
- World Energy Counsil «World Energy Resources-Hydropower » (2016).
- WWF International Dams Initiative «Dams in Europe»
- WWF International Discussion Paper, «A Place for Dams in The 21st Century? »
- Xu et al., «Landslide Dams Triggered by the Wenchuan Earthquake, Sichuan Province, South West China».
- Xu, Zhang, «Simulation of Piping in Earth Dams Due to Concentrated Leak Erosion»
- Yazdanian, Ghasemi, Fahim et al. «EFFECT OF HEIGHT ON THE STATIC STABILITY OF HETEROGENEOUS EMBANKMENT DAMS»
- Zhang, Xu, Jia, «Analysis of earth dam failures: A database approach»

9.2 Sitografia

- http://community.dur.ac.uk/~des0www4/cal/dams/foun/seep4.htm
- http://www.australasianscience.com.au/article/issue-june-2013/small-dams-create-bigger-problems.html
- http://www.hydroquebec.com/visit/cote_nord/manic-5.html
- http://www.sancold.org.za/index.php/about/about-dams/dams-in-south-africa
- http://www.traianvs.net/textos/archdams_en.htm
- https://tataandhoward.com/2016/05/a-history-of-dams-from-ancient-times-to-today/
- https://tataandhoward.com/2016/05/a-history-of-dams-from-ancient-times-to-today/
- https://tataandhoward.com/2016/05/a-history-of-dams-from-ancient-times-to-today/
- https://www.geolounge.com/continents-population-density/
- https://www.independent.co.uk/news/world/asia/the-secret-dam-china-begins-huge-project-in-world-heritage-site-displacing-up-to-100000-people-and-5351298.html
- https://www.kxan.com/news/local/austin/safety-of-central-texas-dams-kept-a-secret_20180227104339113/994706070
- https://www.sacbee.com/news/state/california/water-and-drought/article141963119.html
- https://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/agdex4613