

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria civile

Tesi di Laurea Magistrale

ANALISI STATISTICA DELL'AFFIDABILITÀ DEL PARCO DIGHE INTERNAZIONALE

Relatore

Prof.Ing. Davide Poggi

Candidato

Antonio Signorello

Anno accademico 2020/2021

RINGRAZIAMENTI

Prima di procedere con la trattazione, vorrei dedicare qualche riga a tutti coloro che mi sono stati vicini in questo percorso di crescita personale e professionale.

Un sentito grazie al mio relatore prof. Poggi Davide per la sua infinita disponibilità e tempestività ad ogni mia richiesta. Grazie per avermi fornito ogni materiale utile alla stesura dell'elaborato. Ai miei genitori, che sono il mio punto di riferimento e che mi hanno sostenuta sia economicamente che emotivamente e che mi hanno permesso di percorrere e concludere questo cammino. Grazie per esserci sempre stati soprattutto nei momenti di sconforto. Ringrazio la mia fidanzata Francesca per avermi trasmesso la sua immensa forza e il suo coraggio. Grazie perché ci sei sempre stata. Grazie ai miei colleghi di lavoro Maria ed Elisa per essere stati sempre presenti durante questa ultima fase del mio percorso di studi. Grazie per aver ascoltato i miei sfoghi, grazie per tutti i consigli. Ringrazio i miei amici, i miei compagni di corso: le facce con cui ho condiviso centinaia di ore in facoltà, a lezione, al bar dell'ateneo, le attese agli appelli, le ansie pre-esame, le sbronze postesame. Senza di voi arrivare alla laurea non avrebbe avuto senso e sarebbe stato sicuramente molto più noioso e molto meno divertente!

Infine, vorrei dedicare questo piccolo traguardo a me stesso, che possa essere l'inizio di una lunga e brillante carriera professionale.

INTRODUZIONE

Lo stretto legame tra l'acqua, imprescindibile per la vita, e l'uomo è stato sempre molto complicato, soprattuto nel passato. Dalle origini ai giorni nostri, l'uomo ha gradualmente imparato a gestire le acque a proprio uso e consumo. Le dighe, sbarramenti di corsi d'acqua naturale destinati a regolare il deflusso delle acque e atte a crere un invaso, sono opere idrauliche fondamentali per la gestione delle risorse idriche. Storicamente nascono dall'esigenza di far fronte a periodi di siccità e a inondazioni devastanti, infatti, senza le dighe l'irrigazione sarebbe dipesa dalle esondazioni spontanee di corsi d'acqua, come avveniva nell'antico Egitto. Tutte le civiltà organizzate hanno riscontrato la necessità di coinvogliare e immagazzinare l'acqua dei fiumi, deviandone il corso e/o creando invasi per alimentare acquedotti e canali di irrigazione. Altra funzione, più recente, per la quale vengono realizzate è la produzione di energia idroelettrica: con l'invenzione della turbina, dalla primordiale ruota idrica, le dighe vengono utilizzate oltre che per scopi irrigui e potabili anche per scopi idroelettrici. Sfruttando il salto generato dallo sbarramento e le ingenti quantità di acqua immagazzinate nella vallata sommersa, le dighe permettono di produrre energia green, senza emissioni di CO2. Estremamente importanti per lo sviluppo della vita dell'uomo, le dighe, hanno un impatto ambientale notevole. Molti studi hanno evidenziato che l'allagamento delle vallate in cui scorrevano originariamente i corsi d'acqua interessati dagli sbarramenti e in cui si svilupavano in maniera spontanea fauna e flora, vengono sconvolte in maniera netta e spesso irreversibile. Inoltre, il voler regolarizzare la portata si traduce nel trasformare fiumi in canali con la conseguente modifica di tutto il microsistema che popola gli alvei. Per questo motivo, negli ultimi anni, la costruzione di una nuova diga deve essere giustificata da un notevole beneficio da parte dell'uomo, rispettando normative stringenti: valori minimi di deflusso vitale; capacità di accumulo; sfioratori e scarichi progettati anche in funzione di un piano di laminazione che consenta un abbassamento del rischio idraulico a valle dello sbarramento. Tenendo conto dell'elevato costo ambientale ed economico di tali opere, la necessità di mantenere in esercizio il più a lungo possibile le dighe esistenti risulta essere un argomento molto ricorrente e attuale, considerando anche che la maggior parte delle dighe costruite ha superato i 50 anni di attività.

La tesi si prefigge come obiettivo primario l'applicazione al mondo dell'ingegneria civile ed in particolare alle dighe, di un metodo molto utilizzato nell'ambito industriale, automotive e avio basato sul "System Reliability Modeling". Tale metodo è basato sul concetto di affidabilità, "intesa come la probabilità che un sistema o un componente svolga la funzione per la quale è stato progettato per un periodo di tempo definito". Lo studio pone le sue basi su una precedente tesi il cui prodotto finale è stato la creazione di un database dighe contenente informazioni circa la destinazione d'uso, la tipologia costruttiva del corpo diga, l'anno di costruzione, la tipologia di incidente a cui sono state soggette, l'anno di avvenimento dell'incidente e altre informazioni utili a fini statistici. Utilizzando i dati di tale database e la teoria dell'affidabilità, l'obiettivo finale risulta identificare l'andamento del tasso di guasto e calcolare i valori di affidabilità per le varie tipologie di dighe, oltre a individuare un modello probabilistico per valutare l'affidabilità nel tempo delle grandi dighe.

INDICE

R	INGI	RAZIAMENTI	2
INTRODUZIONE3			
1	T	'EORIA DELL'AFFIDABILITA'	1
	1.1	Elementi di teoria dell'affidabilità	5
	1.2	Parametri di affidabilità	9
	1.3	Modalità di guasto	12
	1.4	Definizione tasso di guasto	14
	1.5	Principali modelli matematici	19
	1.6	Modelli matematici applicati alle fasi di vita	21
	1.7	Diagramma a blocchi di affidabilità (RDB)	24
2	L	E DIGHE	35
	2.1	Principi di funzionamento	38
	2.2	Tipologia di sbarramenti e classificazione	43
	2.3	Organi accessori	51
	2.4	Particolari costruttivi e strumenti per il controllo	65
	2.5	Principali cause di incidenti	68
3	D	OATABASE DIGHE	77
	3.1	Database NPDP	78
	3.2	Database NID	79
	3.3	Database dighe USA	80
	3.4	Database incidenti (analisi dighe USA)	85
	3.5	Distribuzione incidenti su "Piccole" e "Grandi" dighe (analisi dighe USA)	89
4	A	NALISI STATISTICA DELL'AFFIDABILITA' DELLE DIGHE AMERICA	ANE 95
	4.1	Andamento del tasso di guasto, dell'affidabilità e della probabilità di guasto de	lle dighe
	in 20	enerale	98

	2 Andamento del tasso di guasto, dell'affidabilità e della probabilità di guasto delle dighe terra	7
	3 Andamento del tasso di guasto, dell'affidabilita e della probabilità di guasto delle dighe	
	muratura	6
5	APPLICAZIONE DEL MODELLO ESPONENZIALE ALLE GRANDI DIGHE 15	5
	1 Stima del parametro di affidabilità MTTF e applicazione del modello esponenziale alle randi dighe	5
	2 Stima del parametro di affidabilità MTTF e applicazione del modello esponenziale alle	
	randi dighe in muratura15	8
	3 Stima del parametro di affidabilità MTTF e applicazione del modello esponenziale alle	
	randi dighe in terra16	0
C	NCLUSIONI16	3
IN	ICE DELLE FIGURE16	6
B	LIOGRAFIA18	1
SI	OGRAFIA	2

1 TEORIA DELL'AFFIDABILITA'

La teoria dell'affidabilità si prefige di descrivere e misurare la capacità di funzionamento di dispositivi o sistemi ingegneristici. Per ogni dato sistema, tale misura serve a quantificare il grado di "fiducia" che si può avere riguardo al funzionamento del sistema, inteso come assolvimento degli obiettivi per i quali il sistema stesso è progettato e costruito; poiché le prestazioni di ogni sistema tendono inevitabilmente a diminuire nel tempo, è opportuno che l'affidabilità di un sistema sia relazionata al tempo. Tale misura non è altro che un valore numerico, espresso su una scala di numeri reali tra 0 e 1, poiché definita in termini di probabilità. Nelle definizioni di affidabilità e nelle applicazioni di tale disciplina si fa spesso ricorso alla logica binaria che è indicata per lo studio di apparati o sistemi che possono assumere principalmente due configurazioni: sistema funzionante o sistema non funzionante. Tali sistemi vengono detti bistabili. Nella realtà si possono presentare delle difficoltà nella applicazione di tali logiche a base due (sistema numerico binario) quando alcuni apparati, in alcuni casi, degradano le loro caratteristiche ma non degradano la loro missione: in questo caso lo stato del sistema non è più definibile in modo immediato; per questo motivo è necessario definire puntualmente, specialmente nel caso di sistemi complessi, il concetto di "corretto funzionamento" o sistema funzionante. Lo stato di guasto verrà definito mediante l'individuazione di un limite ammissibile nelle prestazioni dell'elemento o sistema: oltrepassato il limite prestazionale predefinito l'elemento in esame viene considerato in stato di guasto. Si possono ad esempio identificare diversi livelli di affidabilità, catalogando i guasti a seconda delle conseguenze che essi determinano nell'ambiente in cui operano. L'analisi affidabilistica fornisce risultati utili in qualunque momento essa venga eseguita, anche se uno studio effettuato sin dalle fasi progettuali consente ovviamente di realizzare interventi molto più efficaci (rapporto costi/benefici più basso). In fase di progettazione possiamo, infatti, individuare i punti deboli del progetto ed i componenti critici del sistema, cioè quelli che influenzano maggiormente l'affidabilità del complesso, e ciò ci consente di scegliere componenti più affidabili o meglio ancora di configurare il sistema in modo da rendere l'affidabilità del complesso meno dipendente dall'affidabilità del componente critico (ridondanza). In fase di esercizio, invece, possiamo solo stabilire una strategia di manutenzione che riduca al minimo i tempi di fuori servizio del sistema ed i costi di manutenzione. L'affidabilità non è una grandezza deterministica ma una probabilità che, come una variabile aleatoria, può essere determinata con formule analitiche e il cui valore può essere previsto solo attraverso considerazioni di tipo probabilistico; essa non fornisce quindi la certezza che un guasto si verifichi o meno, ma applicata in modo sistematico su un sistema, ci dà risultati di notevole utilità sui quali è possibile basare importanti decisioni sulle modalità di funzionamento di un sistema o componente. Nella scienza probabilistica possiamo quindi definire una probabilità vera, che viene generalmente constata a posteriori e, in alcuni casi calcolata a priori, oppure più comunemente dobbiamo parlare di stima di probabilità che viene calcolata secondo le leggi della statistica: tale stima dell'affidabilità è in genere diversa dalla probabilità vera. Esiste sempre una probabilità effettiva che è raramente nota ma sicuramente stimabile in via sperimentale in modo più o meno approssimato a seconda della numerosità e affidabilità del campione statistico considerato. Il concetto di affidabilità può essere applicato a qualsiasi oggetto realizzato dall'uomo, sia esso un oggetto semplice (componente), o uno complesso, costituito dall'insieme di più componenti (sistema). Un aspetto molto importante nello studio dell'affidabilità è proprio il calcolo dell'affidabilità di un sistema a partire dall'affidabilità dei suoi componenti. L'affidabilità del sistema dipenderà dall'affidabilità dei singoli componenti (incluso ovviamente il software) e da come essi interagiscono tra di loro. Inoltre, l'applicazione software, (componente del sistema di controllo), è a sua volta analizzabile come sistema composto da un certo numero di componenti (moduli) software. Per l'affidabilità globale si applica quindi la regola generale di decomposizione gerarchica di un sistema in sottosistemi. Per poter definire correttamente l'affidabilità di un qualsiasi oggetto (componente o sistema) è fondamentale definire precisamente le condizioni operative e la durata della sua attività. Questi due termini (condizioni e durata) sono inglobati nel concetto di missione, che risulta essere un concetto basilare nello studio dell'affidabilità. La definizione data sopra può portarci ad una ulteriore analisi del concetto di affidabilità nel momento in cui cerchiamo di definire con maggior precisione la frase "funzioni correttamente". Non tutti i tipi di malfunzionamento sono ugualmente importanti. Vi sono elementi che anche se da un dato istante di tempo entrano in stato di guasto non comportano una riduzione delle reali funzionalità del sistema, né creano dei rischi per la sicurezza. Al contrario, se si guasta un elemento che definiamo critico il nostro sistema interromperà lo svolgimento delle sue funzioni. Pertanto, fatte queste considerazioni, possiamo sostituire la nostra precedente definizione di affidabilità con la seguente:

"L' affidabilità di un qualsiasi dispositivo (sistema o componente) è la probabilità che esso non abbia guasti di un certo tipo durante il periodo di tempo previsto, intendendo con quest'ultimo la durata della missione (ad esempio, un ciclo di funzionamento, tutta la vita dell'impianto, l'intervallo che intercorre fra due successive operazioni di manutenzione, ecc."

La definizione di affidabilità è legata quindi alla specifica funzione che il sistema deve compiere ed alle condizioni operative nelle quali esso si trova. I vari tipi di affidabilità vengono classificati in base al tipo di guasto che considerano. Una classificazione abbastanza comune è la seguente:

- <u>Affidabilità logistica</u> Probabilità che non capiti alcun guasto (di qualsiasi tipo).
- <u>Affidabilità di missione</u> Probabilità che non capitino guasti con conseguenze maggiori, tali cioè da pregiudicare la funzionalità del sistema e quindi di impedirgli il completamento della sua missione. Se necessario, si distingue tra guasti significativi (che degradano in modo significativo le funzionalità del sistema, ma non impediscono il completamento della missione) e guasti maggiori (che invece impediscono il completamento della missione).
- <u>Sicurezza</u> Probabilità che non capitino guasti con possibili conseguenze catastrofiche, tali cioè da produrre danni a persone, cose o al sistema stesso.

Vi è, inoltre, un altro tipo di affidabilità, meno quantificabile a priori: la probabilità che il sistema funzioni e possa venire usato, in modo sicuro, secondo le esigenze

dell'utente, anche in situazioni critiche per l'utente stesso e/o per gli impianti controllati. La probabilità che le funzioni del sistema siano disponibili a svolgere il loro compito quando se ne manifesta la necessità, anche dopo lunghi periodi di inutilizzo. Definiamo per ora questo tipo di affidabilità, affidabilità di utilizzo. Essa ingloba tutte le categorie affidabilistiche inerenti aspetti umani, di utilizzo, di definizione dei requisiti e delle modalità di utilizzo del sistema, delle competenze necessarie, dell'interazione uomo-macchina, aspetti manageriali, sia di gestione del progetto, sia negoziali e di gestione del contratto. In inglese, la protezione da guasti con possibili conseguenze catastrofiche viene chiamata safety, mentre con il termine security si individua la protezione da accessi non autorizzati e da possibili danneggiamenti volontari. Entrambi i termini si traducono in italiano con il termine sicurezza, e questo a volte può generare confusione. Nel nostro caso, la parola sicurezza sarà sempre associata al concetto di affidabilità e quindi di safety. Il concetto di affidabilità è strettamente legato alla definizione del sistema. Può essere considerato sistema ogni prodotto o servizio che viene impiegato da un utilizzatore. Quindi un sistema è un insieme di elementi materiali e/o non materiali che si comportano come un'unità che si propone la realizzazione di alcune funzioni o servizi. Un sistema può essere sia un insieme assemblato di componenti, che costituisce una parte funzionale di una apparecchiatura, sia una sequenza di operazioni (procedura) per eseguire un servizio: in breve lo possiamo definire come il risultato delle connessioni fisiche e logiche di componenti La risposta funzionale dell'insieme è inequivocabilmente influenzata dallo stato del singolo di conseguenza l'affidabilità di un oggetto complesso deriva dalle affidabilità degli elementi che lo compongono e può essere determinata da una loro combinazione più o meno complessa. Si definisce componente un oggetto, anche complesso, la cui affidabilità può essere caratterizzata solo applicando direttamente i dati statistici provenienti dall'esperienza. Ciascun componente di un sistema ha una precisa funzione da assolvere descritta nella "specifica di un componente" nella quale sono anche indicate le interazioni con altri componenti e le condizioni ambientali nel quale si trova ad operare.

1.1 Elementi di teoria dell'affidabilità

L'analisi di affidabilità, effettuata mediante concetti e strumenti matematici e numerici di tipo probabilistico, è uno strumento che si rivela determinante sia in fase progettuale che in fase di collaudo e di manutenzione di elementi o sistemi di qualsiasi tipo, e nelle analisi costi-benefici. La misura dell'affidabilità mediante parametri numerici avviene, di norma, mediante la quantificazione del tasso di guasto λ oppure tramite MTBF. Vediamo ora i principali parametri affidabilistici:

1.1.1 Densità di probabilità di guasto f(t)

Consideriamo un sistema bistabile cioè che può assumere due diversi stati possibili: stato di guasto o stato funzionante; prendendo come variabile il tempo consideriamo inoltre una determinata popolazione ed una funzione f(t) denominata densità di probabilità di guasto. La probabilità di avere un guasto nell'intervallo di tempo infinitesimo compreso tra t e t+dt, in riferimento alla situazione di guasti nulli (popolazione completa) quando t=0, è f(t)dt. L'area sottesa alla f(t) e uguale all'unita se il limite temporale superiore e posto all'infinito in quanto elemento tende prima o poi a guastarsi.

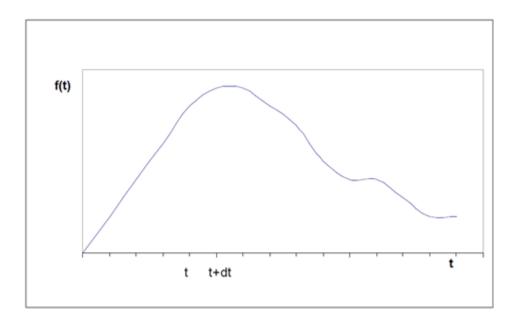


Figura 1.1 - Densità probabilità di guasto

$$\int_0^\infty f(t)dt = 1$$

1.1.2 Distribuzione di probabilità di guasto: Guastabilità F(t)

La funzione $F(t) = \int_0^t f(t)dt$ è la distribuzione di probabilità di guasto (o curva cumulata di probabilità di guasto) e rappresenta la probabilità che l'elemento sia in stato di guasto al tempo t, osserviamo che:

$$\lim_{n\to\infty} F(t) = 1$$

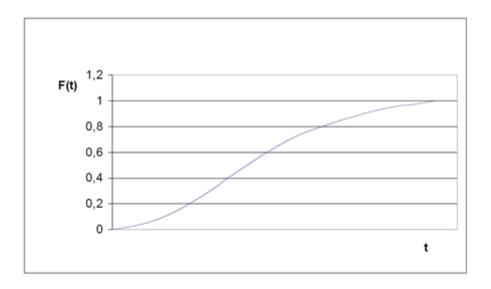


Figura 1.2 - Distribuzione di probabilità di guasto

1.1.3 Affidabilità R(t)

Indicando con R (Reliability) l'affidabilità essa risulta in generale funzione di trevariabili: $R = R(C, A, \tau)$ Dove con C si intende il criterio per giudicare se l'elemento è funzionante o non funzionante il quale dovrà essere fissato in modo univoco; per sistemi bistabili (2 soli stati di funzionamento possibili) tale criterio è ovvio, per altri sistemi è possibile individuare anche stati di funzionamento parziale che rappresentano vari livelli di prestazione; in questi casi lo stato di guasto è definibile una volta che venga fissato un limite ammissibile al di sotto del quale si parla di guasto. Con A si intendono le condizioni ambientali d'impiego che devono

essere stabilite e mantenute durante il periodo di funzionamento dell'elemento o sistema. In fine τ è il tempo di missione durante il quale è richiesto il funzionamento del sistema. Fissati C ed A si ha: R = R(t). L'affidabilità (Reliability) al tempo t è la probabilità che al tempo t l'oggetto sia in stato di buon funzionamento e coincide con la probabilità che l'elemento stesso si rompa da t a ∞

$$R(t) = \int_{t}^{\infty} f(t)dt = \int_{0}^{\infty} f(t)dt - \int_{0}^{t} f(t)dt = 1 - F(t)$$

l'affidabilità è il complemento a 1 della guastabilità F(t).

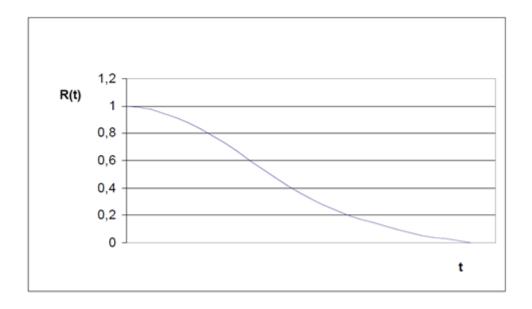


Figura 1.3 - Affidabilità

osserviamo che:

$$\frac{dR(t)}{dt} = -f(t)$$

1.1.4 Relazioni generali

Consideriamo M (0) la popolazione iniziale (al tempo t=0) M(t) la popolazione funzionante al tempo t m il numero di elementi che si guastano tra t e t+dt

$$f(t)dt = \frac{m}{M(0)}$$

$$\lambda(t)dt = \frac{m}{M(t)}$$

$$R(t) = \frac{M(t)}{M(0)} \rightarrow R(t) = \frac{M(t)}{m} \cdot \frac{m}{M(0)} = \frac{f(t)}{\lambda(t)}$$

(determinabile anche con Bayes) abbiamo così otteuto la relazione tra la densità di guasto f(t) e il rateo di guasto $\lambda(t)$:

$$f(t) = \lambda(t) \cdot R(t)$$

esprimiamo tutto in funzione di $\lambda(t)$

$$R(t) = \frac{f(t)}{\lambda(t)} = -\frac{dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{\lambda(t)}$$

$$-\lambda(t)dt = \frac{dR(t)}{R(t)}$$

$$\int_0^t \frac{dR(t)}{R(t)} = \ln R(t) - \ln R(0) \qquad R(0) = 1$$

Riscrivendo l'equazione in un'altra forma e procedendo all'integrazione, abbiamo ottenuto la legge generale, che consente di calcolare la funzione di affidabilità partendo dalla conoscenza, o quanto meno dall'ipotesi di conoscenza, del rateo di guasto della famiglia dei componenti di interesse.

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$$

$$f(t) = \lambda(t) \cdot e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$$

1.2 Parametri di affidabilità

La teoria di misura dell'affidabilità di un componete è affiancata da una serie di parametri, detti parametri di affidabilità, che forniscono un utile strumento per la definizione dei ratei di guasto.

1.2.1 MTTF (Mean Time To Failure)

Un importante parametro è il tempo che intercorre tra due guasti consecutivi denominato MTTF (Mean Time To Failure). Quando ci si riferisce ad oggetti non riparabili si definisce il tempo medio di "buon" funzionamento, calcolato statisticamente su una popolazione, in un predeterminato periodo. Il MTTF rappresenta quindi la vita media dell'elemento. Si definisce il tempo medio fino al guasto il rapporto fra il tempo cumulativo rivelato per il campione considerato ed il numero totale di guasti che si sono manifestati durante il periodo specificato, in condizioni di lavoro prefissato. Il tempo cumulativo di prove è definito dalla seguente equazione:

$$T = \sum_{i=1}^{r} t_i + (N_0 - r) \cdot t_p$$

dove:

ti = tempo nel quale si è verificato il guasto

 N_0 = numerosità del campione sottoposto a test

r = numerosità dei componenti che hanno manifestato un guasto nel periodo di prova

tp = tempo di prova

L'ipotesi di base è che la numerosità del campione rimanga invariata durante l'intero periodo di prova. Quindi il MTTF è dato dal rapporto T/r. La caratteristica intrinseca del parametro consente la sua applicazione a quei componenti che non possono essere riparati. In termini probabilistici, questo parametro descrive la speranza matematica o valore atteso dell'evento considerato; vediamo ora una sua

formulazione rigorosa. Ricordiamo che il valore medio M di una variabile aleatoria discreta è dato dalla seguente relazione:

$$M = \sum_{i=1}^{n} x_i p_i$$

mentre per una varibiale continua:

$$M = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(t) dt$$

il tempo medio di guasto sarà la media di tutti i tempi che abbiamo per arrivare ad un guasto.

$$MTTF = \int_0^\infty t \cdot f(t) dt$$

$$MTTF = \int_0^\infty R(t)dt$$

1.2.2 MTBF (mean time beetwen failure)

Nel caso in cui l'oggetto sia riparabile si prende in considerazione il tempo medio del buon funzionamento tra guasti denominato MTBF (Mean Time Between Failure); praticamente è il parametro precedente qualora si identificasse come nuovo l'oggetto riparato. In altre parole, ipotizzando di partire al tempo t=0 ogni volta che si effettua una riparazione si pone

Si definisce tempo medio tra guasti (*mean time beetwen failure*) il valore medio degli intervalli di tempo tra guasti consecutivi relativamente ad un periodo di vita specificato di un dispositivo. Tale valore viene calcolato come rapporto tra il tempo medio cumulativo osservato ed il numero di guasti rilevati nelle condizioni precisate.

$$MTBF = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^{r} t_{fi}$$

r = numerosità dell'insieme dei componenti che hanno presentato un mal funzionamento

t_{fi} = tempo di funzionamento del componente i-esimo

1.2.3 MTTR (mean time to repair)

In cascata al MTBF si definisce il tempo medio di riparazione MTTR come rapporto fra la somma dei tempi di riparazione dei componenti in analisi ed il numero di componenti che hanno manifestato un mal funzionamento nello stesso intervallo.

$$MTTR = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^{r} t_{ri}$$

r = numerosità dell'insieme dei componenti che hanno presentato un mal funzionamento

t_{ri} = tempo di riparazione del componente i-esimo

Nel caso di componenti riparabili diventa fondamentale il parametro che esprime il tempo medio che intercorre tra l'insorgenza di un guasto ed il completamento della sua riparazione; esso viene detto appunto "Mean Time To Repair" e si indica con la sigla MTTR. Per poterlo definire in analogia al MTTF possiamo fare riferimento a funzioni che sono le analoghe di quelle già definite per l'affidabilità. Questo parametro può essere preso come indice di manutenibilità del dispositivo e si può facilmente intuire che per avere un'affidabilità buona occorre che risulti molto minore del MTBF. In cascata a questo si indica, in contrapposizione al concetto di affidabilità, la disponibilità, intesa come la probabilità che un componente sia funzionante al tempo t, in determinate condizioni di impiego. La disponibilità (availability) parte da valori iniziali unitari per poi giungere, in tempi molto lunghi, ad un valore minimo costante definito dal seguente rapporto:

$$A(\infty) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

1.3 Modalità di guasto

Il termine guasto (failure) è un evento che consiste nella cessazione di un componenente, dispositivo, impianto, sistema, a eseguire la funzione per la quale è stato progettato. Il guasto per tali entità può essere originato da sollecitazioni di varia natura che ne causano il deterioramento e ne riducono la sua resistenza agli stress. In funzione della tecnologia interessata all'evento, i guasti possono essere suddivisi in: guasti meccanici, guasti elettrici, guasti informatici.

I guasti meccanici si manifestano generalmente sotto forma di rottura o deformazione permanente (deformazione plastica). Le cause dei guasti meccanici possono essere molteplici:

- La corrosione
- La fatica dei materiali
- Gli shock termici
- Carichi meccanici esterni superiori a quelli previsti dai progettisti

I guasti elettrici si manifestano generalmente come cedimento dell'isolamento e possono essere causati da:

- Sovraccorenti
- Sovratensioni
- Condizioni ambientali non idonee

I guasti informatici, in ambito elettronico-informatico i guasti possono riguardare sia l'hardware sia il software durante l'esecuzione di un programma.

I guasti possono inoltre essere suddivisi in: guasti permanenti, se una volta comparso perdura nel tempo; non permanenti, se si presenta in maniera instabile e ripetura nel tempo; transienti, se compare solo in concomitanza di particolari e temporanee condizioni ambientali.

Una distinzione fondamentale riguarda la natura del guasto; si possono avere:

- Guasti sistematici: un guasto è di tipo sitematico quando è correlato in maniera deterministica ad una certa causa; in altri termini per i guasti sistematici è possibile individuare una precisa causa. Un guasto di questo tipo è generalmente provocato da errori umani nella fase di progettazione, produzione, installazione o da errato utilizzo; può essere eliminato soltanto mediante una modifica della progettazione o del processo produttivo o delle condizioni di utilizzo.
- Guasti non sistematici: Anche nel caso in cui un componente o un sistema sia stato correttamente progettato, costruito e venga correttamente installato e utilizzato in conformità alle specifiche del costruttore, possono verificarsi guasti. In questo caso risulta non individuabile con certezza la causa. I guasti sistematici possono essere suddivisi ancora in:
 - Guasti infantili: sono rappresentativi del primo periodo di vita del sistema o della famiglia di componenti e sono generalmente dovuti a difetti di fabbricazione, errori di assemblagio.
 - ii. Guasti causali: avvengono durante l'utilizzo ordinario del sistema o dei componenti e sono dovuti a cause aleatorie che provocano l'applicazione di sollecitazioni che superano la resistenza di progetto. In questa fase i guasti sono relativamente pochi. L'intervallo di tempo in cui il sistema o i componenti rientrano nella fase di guasti casuali è detto vita utile del sistema o componente. La vita utile può essere espressa o in ore/anni/secondi di funzionamento o in numeri di cicli.
 - iii. Guasti da usura: avvengono a causa del progressivo invecchiamento dei componenti innescando un processo di naturale degradazione chimico-fisica dei materiali. In questa fase i guasti tendono a diventare più frequenti. I guasti di usura possono essere generati anche da una cattiva manutenzione.

.

1.4 Definizione tasso di guasto

Ogni condizione di funzionamento genera una diversa conseguenza nel sistema o sottosistema in studio; per dare una struttura di tipo numerico alla misura dell'affidabilità di un sistema si ricorre a una formulazione del problema che preveda due possibili stati: un componente assolve correttamente alla sua missione (funziona) oppure no (non funziona). La differenza tra i due stati è strettamente legata alle caratteristiche dell'elemento, del ruolo all'interno del sistema e delle caratteristiche proprie di quest'ultimo. L'elemento che congiunge i due stati estremi considerati è rappresentato dal rateo (o tasso) di guasto $\lambda(t)$.

 $r(t) = \lambda(t) = tasso di guasto al tempo t = numero di guasti nell'unita di tempo riferito ai componenti ancora funzionanti all'inizio dell'intervallo di tempo considerato.$

Il Rateo di guasto è una funzione $\lambda(t)$ tale che la probabilità infinitesima che l'elemento si rompa al tempo t o in un suo intorno infinitesimo dt sia $\lambda(t)$ dt, nell'ipotesi che in t sia ancora funzionante.

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P(t < t + \Delta t: t > t)}{\Delta t}$$

Dimensionalmente è l'inverso di un tempo e può essere interpretato come il numero di guasti nell'unita di tempo, rappresenta quindi una misura della velocità di verificarsi del guasto ("velocità di guasto") $\lambda(t)dt$ è la probabilità corrispondente alla frazione della popolazione che si rompe nell'intervallo (t, t+dt), con riferimento ad una popolazione sana al tempo t quindi minore o uguale alla popolazione iniziale cioè al tempo t=0. La conoscenza del tasso di guasto è molto importante in quanto ci permette di risalire a diverse funzioni affidabilistiche che vedremo in seguito.

La funzione rateo di guasto $\lambda(t)$ può presentare infinite forme diverse raggruppabili però in tre principali andamenti:

 Tasso di guasto crescente, vuol dire che i guasti si verificano con frequenza crescente quando il sistema o il componente invecchia, cioè il sistema peggiora invecchiando.

- Tasso di guasto decrescente, vuol dire che i guasti si verificano con frequanza decrescente quando il sistema o il componente invecchia, cioè il sistema migliora invecchiando.
- Tasso di guasto costante, vuol dire che i guasti si verificano durante l'utilizzo ordinario del sistema o dei componenti, sono dovuti a cause aleatorie che provocano l'applicazione all'elemento soggetto al guasto, di sollecitazioni che superano la resistenza di progetto.

Il complesso dei guasti descritto può essere visualizzato mediante un grafico detto a vasca da bagno (in inglese, bath tub curve) (Figura 1.4) con riportati in ascissa il tempo operativo a partire dall'istante di messa in esercizio del sistema, in ordinata il tasso di guasto, che rappresenta con quale percentuale, nell'unità di tempo, si verificano guasti fra gli elementi rimasti operativi, trascorso un tempo t dall'inizio della messa in funzione.

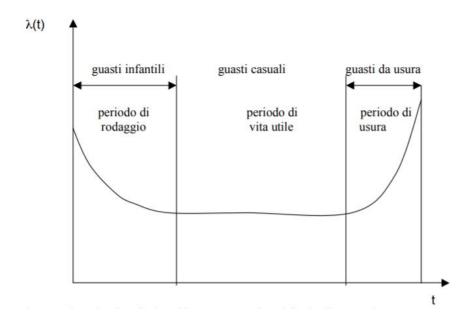


Figura 1.4 - Grafico a vasca da bagno

Esempi di andamento del tasso di guasto

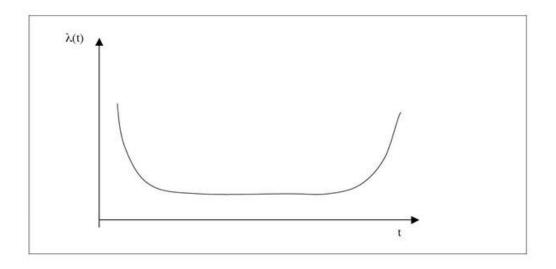


Figura 1.5 – Vasca da bagno, presenti tutte e tre le fasi, sistemi complessi

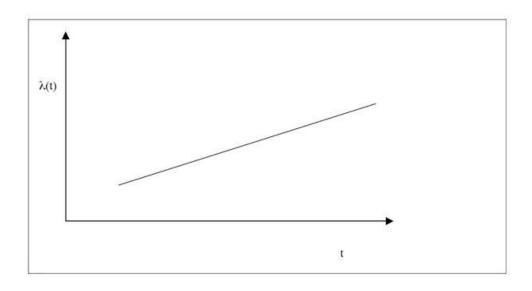


Figura 1.6 - Usura lenta crescente

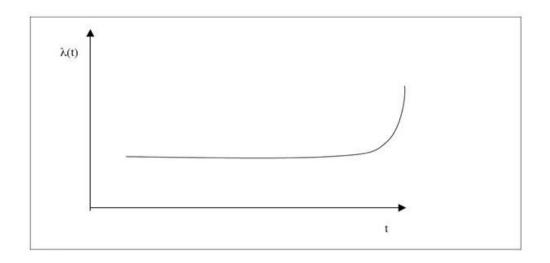


Figura 1.7 – Mortalità finale, componenti meccanici soggetti a usura nella parte finale di vita

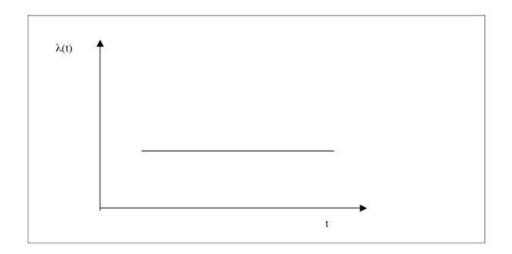


Figura 1.8 - Guasti dovuti a incidenti casuali

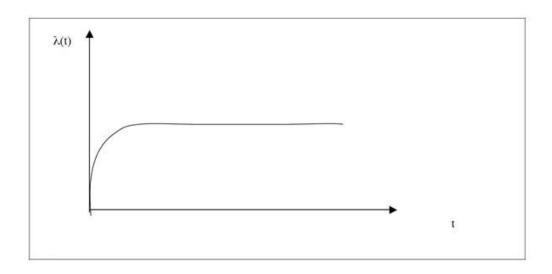


Figura 1.9 – Inizialmente crescente poi stabile

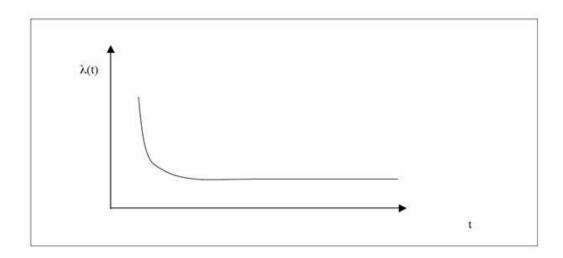


Figura 1.10 – Mortalità infantile elevata seguita da guasti casuali

1.5 Principali modelli matematici

Le relazioni esistenti tra le funzioni $\lambda(t)$, f(t), F(t), R(t) ci permettono, nota almeno una di esse, di determinare immediatamente anche le altre tre, risultando in questo modo intercambiabili. La funzione rateo di guasto $\lambda(t)$ può presentare infinite forme diverse raggruppabili però in tre principali andamenti: $\lambda(t)$ può essere infatti costante, crescente o decrescente; in seguito, vedremo la forma delle funzioni $\lambda(t)$, f(t), F(t), R(t) in funzione dell'andamento del tasso di guasto; più elevato è il numero di elementi testati e più precisa risulta la valutazione della probabilità di funzionamento. Solo provando infiniti elementi per un tempo infinito si avrebbe l'esatta legge di guasto quindi utilizzandone un numero limitato anche la precisione nella valutazione dell'affidabilità sarà limitata. Esistono molte leggi che caratterizzano la probabilità di guasto nel tempo e quindi l'affidabilità per diversi tipi di componenti. Vediamo i principali modelli matematici impiegati:

Gaussiana (normale)

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Esponenziali negative

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Lognormali

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log_{10}(t-\mu)}{\sigma}\right)^2}$$

Funzione di Weibull

$$y(x) = e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}}$$

La distribuzione di Weibull è una funzione multiforme a due parametri positivi α e β . Grazie alla sua duttilità, tale modello viene usato per esprimere la funzione affidabilità sia durante la fase dei guasti infantili, sia durante la vita utile.

I parametri α e β rappresentano:

α è il fattore di scala

 β è il parametro di forma ed è un numero puro. Generalmente varia tra 0.5 e 5. Se <1 la funzione e monotona decrescente, se > 1 prima cresce e poi decresce.

Al variare del fattore di forma β , la funzione assume aspetti ben diversi, come visibile nella Figura 1.11.

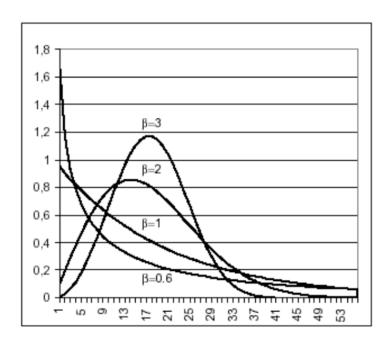


Figura 1.11 - Funzione di Weibull

1.6 Modelli matematici applicati alle fasi di vita

Per ognuna delle tre fasi del componetente o sistema e necessario individuare dei modelli teorici che descrivano l'andamento delle funzioni f(t); $\lambda(t)$; R(t)

1.6.1 Guasti durante la Vita Utile

La zona più interessante ai fini dell'affidabilità è quella riferibile al periodo di vita utile corrispondente alla zona centrale del diagramma a "vasca da bagno". In questa zona per semplicità si assume $\lambda(t)$ costante e l'affidabilità può essere espressa con una legge esponenziale negativa del tipo:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

e si dimostra che il tempo medio di guasto MTBF assume un valore coincidente con l'inverso del tasso di guasto.

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

Abbiamo così ottenuto una relazione semplice e diretta che lega un valore λ tipicamente analitico e progettuale con un parametro operativo quale è il MTBF. La costanza di λ implica infatti un valore medio dell'intervallo di tempo tra due guasti anch'esso costante, per cui è possibile stimare con una certa precisione il momento in cui componente si guasterà in futuro. Una progressiva diminuzione dell'intervallo medio di buon funzionamento è indicativa del raggiungimento del termine della vita utile dell'elemento rappresentata dall'ultima zona (zona 3) del diagramma. Per ridurre il tasso di guasto e quindi per aumentare l'affidabilità si ricorre generalmente ad una politica manutentiva di prevenzione basata su operazioni eseguite ad intervalli di tempo programmati tali da assicurare l'affidabilità e la disponibilità richieste prevenendo il verificarsi del guasto. La determinazione del corretto intervallo di intervento preventivo dipende quindi dall'andamento del tasso di guasto λ e conseguentemente dall'andamento del MTBF nella zona di vita utile.

1.6.2 Guasti infatili

La fase iniziale di vita del componenteo o sistema viene descritta con una distribuzione di Weibull della funzione affidabilità R(t).

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}}$$

e la percentuale di popolazione che si guasta al tempo t viene rappresentata dalla seguente forma:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}}$$

mentre la densità di probabilità di guasto è rappresentata dalla seguente relazione:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot t^{\beta - 1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}}$$

La distribuzione di *Weibull* con β =1, può essere utilizzata per descrivere la fase di vita utile del componente o sistema:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}} = e^{-\frac{t}{\alpha}}$$

con $\lambda = 1/\alpha$, ricordando che MTBF=1/ λ , otteniamo MTBF= α da cui il nome di" vita caratteristica per α "

1.6.3 Guasti per usura

La fase di vita corrispondente al periodo di usura viene frequentemente descritta mediante la distribuzione normale della densità di probabilità di guasto f(t)

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

dove μ = valor medio e σ = deviazione standard (scarto quadratico medio)

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{(t_i - \mu)^2}{n - 1}$$

Adimensionalizzando tramite la variabile z (detta variabile ridotta) si ottiene:

$$Z = \frac{t - \mu}{\sigma}$$

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}z^2}$$

Che è una funzione simmetrica rispetto all'asse delle ordinate, massima per z=0. La funzione cumulata stima la probabilità di ottenere misure con valori inferiori o uguali a z.

$$F(z) = \int_{-\infty}^{z} \sigma \cdot f(\xi) \cdot d\xi$$

Funzione cumulata: probabilità di ottenere misure con valori inferiori o uguali a z. Tale funzione è simmetrica per cui vale la proprietà

$$F(-z) = 1 - F(z)$$

Nel caso di rotture per fatica, risulta spesso più appropriata la distibuzione lognormale

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log_{10}(t-\mu)}{\sigma}\right)^2}$$

1.7 Diagramma a blocchi di affidabilità (RDB)

Abbiamo visto che l'affidabilità dei singoli componenti viene determinata mediante studi statistici più o meno approfonditi: per l'affidabilità di un sistema si ricorre a un'analisi dal punto di vista delle logiche di guasto. Mentre in precedenza abbiamo trattato l'affidabilità del singolo componente o elemento, a prescindere dalla sua complessità, ora andremo ad individuare le relazioni che legano l'affidabilità di un sistema costituito da più elementi, interagenti tra loro a causa delle diverse connessioni fisiche e logiche. Molti dei concetti spiegati nel paragrafo sono basati sull'utilizzo di un sistema di processo gerarchico a livelli. Il RBD (Reliability block diagram) è un modo pittorico di mostrare il successo o il fallimento di combinazioni per un sistema. Un sistema a blocchi di affidabilità presenta una relazione logica del sistema, sottosistema e dei componenti.

Le linee guida per la costruzione RBD:

- 1. Un gruppo di componenti essenziali per il funzionamento di un sistema devono essere collegati in serie.
- Componenti che possono sostituire altri componenti sdevono essere collegati in parallelo.
- 3. Ogni blocco nel diagramma è come un interruttore: esso è chiuso quando il componente che rappresenta sta lavorando ed è aperto quando il componente è guasto (non funziona). Un percorso chiuso attraverso il diagramma rappresenta un percorso funzionante (sistema funzionante).

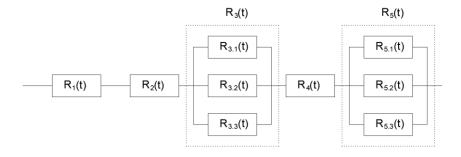


Figura 1.12 - Esempio di RBD

1.7.1 Sistema in serie

In un sistema in serie, tutti i sottosistemi devono funzionare per far si che il sistema funzioni. Questo implica che il guasto di uno dei sottosistemi causi il non blocco dell'intero sistema.

L'affidabilità di ogni blocco è indicata con $R_n(t)$ e il tempo di funzionamento è rappresentato da TTF(n) Figura 1.13.

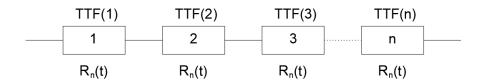


Figura 1.13 - Sistema in serie

L'affidabilità del sistema può essere determinata usando i principi di base della probabilità, noi possiamo assumere che tutti i sottostistemi sono probabilisticamente indipendenti. Questo significa che il funzionamento o non funzionamento di ogni sottosistema non dipende da altri sottosistemi. Poniamo E_s come l'evento che il sistema funzioni e E_i come l'evento che ogni i-esimo sottostistema funzioni con i=1,2,3,..., n. Se chiamiamo la variabile casuale tempo al guasto per ogni i-esimo sottosistema T_i con i=1,2,3,..., n.

L'affidabilità di un sistema è data da:

$$R_s = P[E_s] = P(E_1 \cap E_2 \cap E_3 \cap E_n)$$

Poiché il sistema funzioni tutti i sottosistemi devono funzionare, se tutti gli eventi E_i sono probabilisticamente indipendenti:

$$R_s = P(E_1) \cdot P(E_2) \cdot P(E_3) \cdot P(E_n) = \prod_{i=1}^n R_i$$

$$R_s(t) = P[(T_1 > t) \cap (T_2 > t) \cap (T_3 > t) \cap (T_n > t)]$$

$$R_{s}(t) = R_{1}(t) \cdot R_{2}(t) \cdot R_{3}(t) \cdot R_{n}(t) = \prod_{i=1}^{n} R_{i}(t)$$

Dall' equazione è chiaro che l'affidabilità del sistema si riduce con un incremento del numero di sottosistemi e componenti in serie. Assumendo che il tempo al guasto abbia una distribuzione per ogni sottoinsieme exp con tasso di guasto costante pari a λ_i , l'affidabilità del componente è:

$$R_i(t) = e^{-\lambda_i t}$$

Allora l'affidabilità del sistema è data da:

$$R_{s}(t) = \prod_{i=1}^{n} R_{i}(t) = \prod_{i=1}^{n} e^{-(\sum_{i=1}^{n} \lambda_{i})t}$$

Se il sistema ha una distribuzione esponenziale, la costante tasso di guasto del sistema è data da:

$$\lambda_{s} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{i}$$

E il tempo medio tra i guasti per il sistema è

$$MTBF = \frac{1}{\lambda_s} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}$$

Il tasso di guasto del sistema è costante se tutti i componenti del sistema sono in serie e hanno tassi di guasto costanti. Le ipotesi di un tasso di guasto costante e sistema in serie semplificano la matematica, ma questo è raramente il caso nella pratica. Per il caso generale, prendendo il logaritmo di entrambi i lati dell'equazione abbiamo:

$$\ln R_s(t) = \sum_{i=1}^n \ln R_i(t)$$
 (1.7.1)

Ricordando anche

$$R(t) = exp\left[-\int_0^t \lambda(\tau)d\tau\right]$$

Che significa che

$$\int_0^t \lambda(\tau)d\tau = -\ln R(t)$$

0

$$\lambda(t) = -\frac{d}{dt} \ln R(t)$$

Applicando questo all'equazione (1), abbiamo

$$\lambda_s(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t)$$

Pertanto, il tasso di tasso di guasto per il sistema è la somma dei tassi di guasto dei sottosistemi presupponendo che le variabili casuali time-to-failure per tutti i sottosistemi siano indipendenti, indipendentemente dalla forma della funzione di densità di probabilità.

1.7.2 Sistema in parallelo

Un sistema ridondante attivo è un sistema "parallelo" standard. Questo fallisce solo quando tutti i componenti si sono guastati.

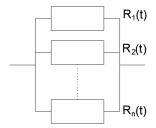


Figura 1.14 - Sistema in parallelo

Lo schema a blocchi dell'affidabilità di un sistema parallelo è riportato nella Figura 1.14. Non è necessario che le unità siano fisicamente collegate in parallelo affinché il sistema venga chiamato a sistema parallelo. Il sistema fallirà se tutti i sottosistemi o tutti i componenti falliranno entro il tempo t, o il sistema sopravviverà al tempo della missione, t, se almeno una delle unità sopravviverà nel tempo t. Quindi, l'affidabilità del sistema può essere espressa come:

$$R_s(t) = 1 - Q_s(t)$$

dove Q_s (t) è la probabilità di guasto del sistema

$$Q_s = [1 - R_1(t)] \times [1 - R_2(t)] \times \dots \times [1 - R_n(t)] = \prod_{i=1}^{n} [1 - R_i(t)]$$

Presupponendo che il tempo al guasto sia una variabile aleatoria per tutti i sottosistemi e quindi probabilisticamente indipendenti. L'affidabilità del sistema per un tempo di missione, t, è pari a:

$$R_s(t) = 1 - \sum_{i=1}^{n} [1 - R_i(t)]$$

1.7.3 Sistema parallelo standby

Un sistema in standby è costituito da un'unità o sottosistema attivo e uno o più unità inattivi (standby) che si attivano in caso di guasto dell'unità funzionante. I guasti delle unità attive sono segnalati da un sottosistema di rilevamento e l'unità di standby viene attivata da un sottosistema di commutazione. La configurazione di standby più semplice è un sistema a due unità, come mostrato nella Figura 1.15. In generale, ci sarà n numero di unità con (n - 1) di loro in standby. Sviluppiamo ora i modelli di affidabilità del sistema per la situazione di standby con due sottosistemi. Sia fi (t) il pdf per la variabile casuale del tempo al guasto, Ti, per l'i-esimo unità, i = 1, 2 e fS (t) è il pdf per la variabile casuale del tempo al guasto, TS, per il sistema. Consideriamo prima una situazione con solo due unità supponendo che i meccanismi di rilevamento e commutazione siano perfetti. Pertanto, la seconda unità viene commutata quando il primo componente si guasta. Quindi, TS = T1 + T2 e TS non è altro che una convoluzione di due variabili casuali.

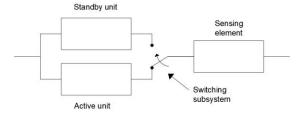


Figura 1.15 - Sistema parallelo standby

$$f_s(t) = \int_0^t f_1(x) f_2(t-x) dx$$
 (1.7.2)

Allo stesso modo, se abbiamo un componente attivo primario e due componenti in standby, abbiamo:

$$f_s(t) = \int_0^t \int_0^x f_1(y) f_2(x - y) f_3(t - x) dy dx$$
 (1.7.3)

Possiamo valutare l'equazione (1.7.2) quando sia T1 che T2 hanno distribuzione esponenziale:

$$f_{S}(t) = \int_{0}^{t} \lambda_{1} e^{-\lambda_{1} x} \lambda_{2} e^{-\lambda_{2}(t-x)} dx = \frac{\lambda_{1} \lambda_{2}}{\lambda_{1} - \lambda_{2}} e^{-\lambda_{2} t} + \frac{\lambda_{1} \lambda_{2}}{\lambda_{2} - \lambda_{1}} e^{-\lambda_{1} t}$$
(1.7.4)

Dall'equazione (1.7.4), abbiamo

$$R_s(t) = \int_t^\infty f_s(x) dx = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-\lambda_2 t} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \quad (1.7.5)$$

L'MTBFS, θ_s , per il sistema è dato da

$$\theta_s = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}$$

Come previsto poiché TS=T1+T2 e E[TS]=E[T1] +E[T2]. Quando le unità attiva e standby hanno tassi di guasto costanti uguali, λ e le unità di commutazione e di rilevamento sono perfette, la funzione di affidabilità per un tale sistema è data da

$$R_s(t) = e^{-\lambda t}(1 + \lambda t).$$

Possiamo riscrivere l'equazione (1.7.5) nella forma

$$R_{s}(t) = e^{-\lambda_{1}t} + \frac{\lambda_{1}}{\lambda_{1} - \lambda_{2}} \left(e^{-\lambda_{2}t} - e^{-\lambda_{1}t} \right),$$

o come mostrato nell'equazione (1.7.6), dove AR (2) è il contributo al valore di affidabilità del sistema del secondo componente

$$R_s(t) = e^{-\lambda_1 t} + AR_{(2)}$$
 (1.7.6)

Questo può essere facilmente generalizzato a una situazione in cui abbiamo una componente primaria e due o più componenti in standby. Ad esempio, se abbiamo una componente primaria e (n-1) componenti in standby e tutti hanno un tempo esponenziale per il guasto con un tasso di guasto costante λ , la funzione di affidabilità del sistetma è data da

$$R_s(t) = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^{n-1} (\lambda t)^i / i!$$

1.7.4 Sistema parallelo standby con commutazione imperfetta

I sistemi di commutazione e rilevamento non sono perfetti. Ci sono molti modi in cui questi sistemi possono fallire. Esaminiamo una situazione in cui l'unità di commutazione e rilevamento semplicemente falliscono quando sono chiamati a svolgere il proprio lavoro. La probabilità che l'interruttore funzioni quando richiesto risulta essere psw. Quindi, l'affidabilità del sistema per un componente principale e uno in standby è data da

$$R_s(t) = R_1(t) + p_{SW} \int_0^t f_1(x) R_2(t - x) dx$$
 (1.7.7)

Quando le unità principali e di standby hanno distribuzioni esponenziali del tempo fino al guasto, possiamo usare l'equazione (1.7.6) per sviluppare la seguente equazione:

$$R_{\scriptscriptstyle S}(t) = e^{-\lambda_1 t} + p_{\scriptscriptstyle SW} A R_{(2)}$$

Ora, generalizziamo l'equazione (1.7.7), dove si trova l'unità di commutazione e rilevamento dinamico. L'unità di commutazione e di rilevamento iniziano la loro vita contemporaneamente all'attivazione dell'unità principale. Se TSW denota il tempo al fallimento per la commutazione e l'unità di rilevamento, dove le sue funzioni pdf e affidabilità sono indicate con $f_{SW}(t)$ e $R_{SW}(t)$, rispettivamente. Quindi l'affidabilità del sistema è data da

$$R_s(t) = R_1(t) + \int_0^t f_1(x) R_{sw}(x) R_2(t - x) dx \quad (1.7.8)$$

Se il tempo di guasto dell'unità di commutazione e rilevamento segue una distribuzione esponenziale con un tasso di fallimento di λ_{SW} l'equazione (1.7.8) si riduce a

$$R_s(t) = R_1(t) + \int_0^t f_1(x) e^{-\lambda_{SW}x} R_2(t - x) dx \quad (1.7.9)$$

Se consideriamo un caso speciale in cui sia l'unità principale che le unità di standby hanno distribuzioni esponenziali fino al tempo di guasto con parametro λ , l'equazione (1.7.9) si riduce a

$$R_s(t) = e^{-\lambda t} \left[1 + \frac{\lambda}{\lambda_{sw}} \left(1 - e^{-\lambda_{sw} t} \right) \right], \quad t \ge 0.$$

1.7.5 Sistema parallelo a caricamento condiviso

Una situazione comune nei sistemi di ingegneria è chiamato sistema parallelo a carico condiviso. In questo caso, i due componenti / unità paralleli condividono un carico insieme. Pertanto, il carico su ciascuna unità è la metà del carico totale. Quando una delle unità si guasta, l'altra unità deve sostenere il pieno carico. Un esempio di un carico condiviso parallelo è quello in cui vengono utilizzati due bulloni per trattenere un elemento della macchina e se uno dei bulloni si rompe, l'altro deve sostenere il pieno carico. Le sollecitazioni sul bullone ora saranno raddoppiate e questo si tradurrà in un aumento del tasso di rischio per il bullone sopravvissuto. Siano f_{1h} (t) e f_{2h} (t) i pdf per il tempo mancante per le due unità a carico condiviso, f_{1F} (t) e f_{2F} (t) siano rispettivamente i pdf a pieno carico per ciascuna unità. In questo caso, possiamo trovare che il pdf per il tempo al guasto del sistema è

$$f_s(t) = \int_0^t f_{1h}(x) R_{2h} f_{2F}(t-x) dx + \int_0^t f_{2h}(x) R_{1h} f_{1F}(t-x) dx$$

La funzione di affidabilità per il sistema se entrambe le unità sono identiche (come identici bulloni), $f_{1h}(t) = f_{2h}(t) = f_h(t)$ e $f_{1F}(t) = f_{2F}(t) = f_F(t)$, può essere ricavata come:

$$R_s(t) = [R_h(t)]^2 + 2 \int_0^t f_h(x) R_h(x) R_F(t-x) dx$$

Se sia f_h (t) che f_F (t) seguono distribuzioni esponenziali con parametri λ_h e λ_F , rispettivamente, allora si può dimostrare che la funzione di affidabilità per il sistema è pari a:

$$R_{s}(t) = e^{-2\lambda_{h}t} + \frac{2\lambda_{h}}{2\lambda_{h} - \lambda_{F}} \left[e^{-\lambda_{F}t} - e^{-2\lambda_{h}t} \right]$$

1.7.6 Sistema k-out-of-n o (k, n)

Un sistema costituito da n componenti è chiamato sistema k-out-of-n o (k, n) se il sistema funziona solo quando almeno k o più componenti sono in uno stato operativo. Il diagramma a blocchi di 'affidabilità (Figura 1.16) per il sistema k-out-of-n è disegnato in modo simile al sistema parallelo, ma in questo caso almeno k elementi devono essere operativi per far si che il sistema funzioni. In questa configurazione, il sistema funziona se e solo se almeno k componenti su n componenti funzionano, $1 \le k \le n$.

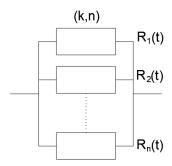


Figura 1.16 - Sistema (k, n)

Nelle condizioni dove $R_i = R$ (t) per tutti i componenti o sottosistemi e con l'ipotesi che i tempi al guasto siano variabili casuali e indipendenti, abbiamo che l'affidabilità del sistema è pari a:

$$R_s(t) = \sum_{i=k}^{n} {n \choose i} [R(t)]^i [1 - R(t)]^{n-1}$$

La probabilità di guasto del sistema è pari a:

$$Q_s(t) = 1 - R_s(t) = 1 - \sum_{i=k}^{n} {n \choose i} [1 - Q(t)]^i [Q(t)]^{n-1}$$
$$= \sum_{i=0}^{k-1} {n \choose i} [1 - Q(t)]^i [Q(t)]^{n-1}$$

ove
$$Q(t) = 1 - R(t)$$

La funzione di densità di probabilità può essere determinata come:

$$f_s(t) = \frac{dQ_s(t)}{dt}$$

e il tasso di rischio del sistema è dato da

$$\lambda_{\scriptscriptstyle S}(t) = \frac{f_{\scriptscriptstyle S}(t)}{R_{\scriptscriptstyle S}(t)}$$

Se $R(t) = e^{-t/\theta}$, per il caso esponenziale, l'MTBF per il sistema è dato da $\sum_{i=k}^{n} \frac{\theta}{i}$

La funzione di affidabilità del sistema risulta complessa da calcolare in forma chiusa quando i componenti hanno distribuzioni dei guasti differenti.

2 LE DIGHE

Per capire l'importanza del ruolo che svolgono queste grandi opere, oggetto di studio della mia tesi, nello sviluppo della vità dell'uomo, è sufficiente pensare che la metà delle dighe esistenti nel mondo è stata realizzata con lo scopo di aiutare l'agricoltura. Il rapporto della Commissione mondiale sulle dighe (The report of the World commission on dams) stima che: "quasi quattro campi irrigati su dieci ricevono acqua direttamente da questi impianti, con il risultato che fra il 12 e il 16% della produzione del cibo nel mondo dipende direttamente dalle dighe. In altre parole, se nel mondo non vi fossero le dighe, il cibo a disposizione diminuirebbe quasi di un sesto. Dal punto di vista energetico, si calcola che il 19% dell'energia mondiale sia di tipo idroelettrico. Questo significa che un quinto della corrente elettrica nel mondo è prodotto sfruttando l'energia della caduta dell'acqua da grandi altezze, ossia servendosi dei bacini idroelettrici formati dalle dighe". La normativa italiana non riporta una definizione esplicita del termine "diga" e questo può far sorgere incertezze sul fatto che un'opera idraulica sia da considerarsi una diga e sia pertanto soggetta alle disposizioni di legge sulla costruzione e sull'esercizio di dighe e traverse. A questo riguardo, la letteratura tecnica definisce in maniera univoca le dighe come: "Opere realizzate per creare uno sbarramento di un corso d'acqua naturale che scorre all'interno di una vallata determinando la conseguente creazione di un lago artificiale a monte dello sbarramento". Le principali funzioni per la quale si costruivano e tuttoggi si continuano a costruire le dighe sono le seguenti:

- Generare una riserva d'acqua da poter utilizzare per molteplici scopi (irrigazione, uso potabile, produzione di energia) a seconda delle necessità e senza dipendere dalle precipitazioni meteoriche o dal quantitativo di acqua presente nel corso d'acqua;
- Regolare le portate fluviali, laminare le piene e integrare le portate naturali del corso d'acqua nei periodi di magra;
- Intercettare il corso di un fiume e semplificare la captazione dell'acqua, alzando il livello del pelo libero e quindi permettendo di prelevare l'acqua

- ad un livello più alto, evitando così di intercettare materiale solido trasportato dal corso d'acqua;
- Trattenere i materiali solidi trasportati in sospensione o sul letto del fiume, abbassano il rischio di danneggiare o ostruire opere come: mulini, pile di ponti, ecc.

La normativa italiana permette di classificare le dighe, come "grandi" o "piccole", in funzione delle dimensioni dello sbarramento (in particolare l'altezza) e quelle dell'invaso, assegnandone la competenza (per quanto attiene alla vigilanza sulla progettazione, esecuzione ed esercizio da parte dei concessionari) allo Stato o alle Regioni e Province autonome. In particolare, la Legge 21 ottobre 1994, n. 584 prevede che rientrino nella competenza dello Stato (e dunque del Servizio Nazionale Dighe, oggi Direzione Dighe del M.I.T.) "le opere di sbarramento, dighe di ritenuta o traverse che superano 15 metri di altezza o che determinano un volume di invaso superiore a 1'000'000 di metri cubi" [c.d. "grandi dighe"]; invece, rientrano nella competenza delle Regioni e delle Province autonome di Trento e Bolzano "gli sbarramenti che non superano i 15 metri di altezza e che determinano un invaso non superiore a 1'000'000 di metri cubi" [c.d. "piccole dighe"]. Ai fini dell'attribuzione delle competenze allo Stato o alle Regioni e Province autonome, la stessa Legge 21 ottobre 1994, n. 584, e ancor meglio la successiva Circolare P.C.M. 13 dicembre 1995, n. DSTN/2/22806, hanno introdotto le seguenti definizioni di altezza della diga e di volume di invaso:

- "Con il termine di «altezza» si intende la differenza tra la quota del piano di coronamento, ovvero del ciglio più elevato di sfioro nel caso di traverse prive di coronamento, e quella del punto più depresso dei paramenti da individuare su una delle due linee di intersezione tra paramenti e piano di campagna"
- "Con il termine «volume di invaso» si intende la capacità del serbatoio compresa tra la quota più elevata delle soglie sfioranti degli scarichi, o della sommità delle eventuali paratoie (quota di massima regolazione), e la quota del punto più depresso del paramento di monte da individuare sulla linea di intersezione tra detto paramento e piano di campagna"

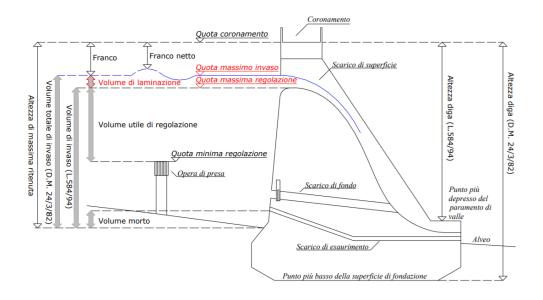


Figura 2.1 - Principali elementi e grandezze di una diga secondo la vigente normativa italiana

Spesso nellla lingua "parlata" si utilizza il termine dighe anche quando si fa riferimento alle traverse; la letteratura tecnica per evitare confusione definisce traversa fluviale "uno sbarramento che determina un rigurgito contenuto nell'alveo del corso d'acqua, con la finalità di innalzare il livello di monte per favorire la derivazione delle acque".

2.1 Principi di funzionamento

Il funzionamento delle dighe si basa sulla legge di conservazione, il loro scopo è compensare le differenze tra le portate in entarata ed in uscita, fungendo da serbatoi di compenso: tali serbatoi permettono di avere un andamento nel tempo delle portate in uscita differente da quello delle portate in entrata. Tale obiettivo si raggiunge accumulando l'acqua in eccesso quando la portata in ingresso è maggiore di quella in uscita (SURPLUS) e restituendola, come integrazione, quando la portata in ingresso è minore di quella in uscita (DEFICIT). Affinchè questo alternarsi di invasi e svasi sia sempre possibile è necessario che il serbatoio abbia un volume disponibile a tale scopo, detto capacità di compenso V_c .

L'equazione che regola il dimensionamento dei serbatoi di compenso è l'equazione di continuità:

$$\frac{dV(t)}{dt} = Q_i(t) - Q_u(t) - Q_s(t)$$

Ove:

- $Q_i(t)$ è la portata in ingresso nel serbatoio (che corrisponde alla portata media giornaliera mediata su N anni del fiume $\bar{Q}_f(t)$;
- $Q_u(t)$ è la portata in uscita del serbatoio (richiesta dell'utilizzatore: Centrale idroelettrica, contadini, ..., ecc; deflusso minimo vitale (DMV));
- $Q_s(t)$ è la portata sfiorata dal serbatoio;
- $dV/_t$ è la variazione di volume all'interno del serbatoio;
- t è l'istante temporale a cui si fa riferimento.

Il volume di compenso viene determinato con diverse procedure a secondo del tipo di regolazione.

2.1.1 Regolazione Totale

Con essa s'intende che verrà utilizzata tutta la risorsa idrica del fiume, in termini di volume. Cioò implica che non vi saranno portate sfiorate né carenze idriche complessive. L'equazione di continuità assumerà la forma:

$$\frac{dV(t)}{dt} = Q_i(t) - Q_u(t)$$

Da cui il volume invasato dal serbatoio ad un dato istante sarà pari a:

$$V(t) = \int_0^{\tau} [Q_i(t) - Q_u(t)]dt + V_0$$

Ove V_0 (che matematicamente rappresenta la costante di integrazione) è il volume iniziale presente nel serbatoio e lo si ha ogni qual volta vi siano dei periodi temporali in cui il volume cumulato in uscita risulta maggiore di quello cumulato in entrata (per evitare situazioni di deficit la curva dei volumi cumulati in ingresso dovrà essere traslata proprio di tale quantità V_0)

Pertanto, con la regolazione totale, risulterà che i volumi cumulati totali in ingresso ed in uscità saranno uguali:

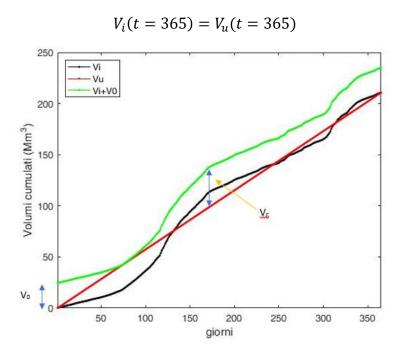


Figura 2.2 - Esempio curva dei volumi cumulati per regolazione totale

Nel caso di regolazione totale la capacità di compenso vale:

$$V_c = max([V_i(t) + V_0] - V_u(t))$$

La Figura 2.2 costituisce un esempio pratico di volumi cumulati nel caso di regolazione totale; l'andamento lineare della curva dei volumi cumulati in uscita deriva da un andamento costante delle portate in uscita. Tale concetto di per sé non implica regolazione totale, poiché la portata in uscita può assumere qualsiasi forma (da cui anche la curva dei volumi cumulati in uscita). Il concetto di regolazione totale prevede l'uguaglianza dei volumi cumulati complessivamente in entrata e in uscita, indipendentemente dalla forma delle curve di portata nell'idrogramma.

2.1.2 Regolazione con sfioro

In tal caso non verrà utilizzata tutta la risorsa del fiume, ossia vi sarà una portata sfiorata con annesso volume cumulato sfiorato. L'equazione di continuità assumerà tale forma:

$$\frac{dV(t)}{dt} = Q_i(t) - Q_u(t) - Q_s(t)$$

Da cui il volume invasato del serbatoio ad un dato istante sarà pari a:

$$V(t) = \int_0^{\tau} [Q_i(t) - Q_u(t) - Q_s(t)]dt + V_0$$

Pertanto, con la regolazione con sfioro, risulterà che i volumi cumulati totali in ingresso ed in uscita non saranno uguali, ma:

$$V_i(t = 365) = V_{ii}(t = 365) + V_{ii}(t = 365)$$

In tal caso la capacità di compenso sarà pari alla massima differenza tra i volumi cumulati uscenti ed entranti, calcolati per ciascuno dei periodi di deficit:

$$V_c = max([V_i(\Delta t_{deficit} + V_0] - V_u(\Delta t_{deficit}))$$

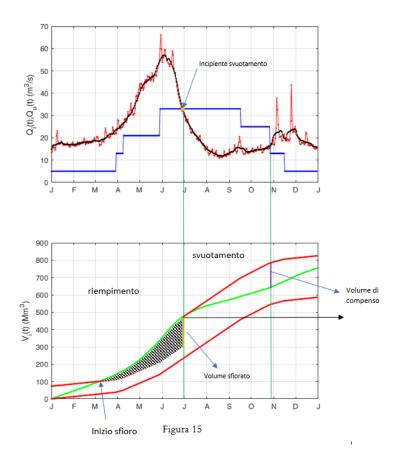


Figura 2.3 - Esempio di idrogramma e curva dei volumi cumulati per regolazione con sfioro

2.1.3 Regolazione con deficit

Tale situazione si verifica quando il volume d'acqua, richiesto nel periodo caratteristico di riferimento del sisetma idrico, risulta maggiore di quello che, nello stesso periodo, è disponibile per il prelievo della risorsa idrica. In tal caso il volume di compenso sarà pari a:

$$V_c = max([V_i(\Delta t_{surplus} + V_0] - V_u(\Delta t_{surplus}))$$

2.1.4 Curva dei volumi

La curva dei volumi è lo strumento che permette, noto il volume di compenso calcolato come illustato nei precedenti paragrafi, di determinare l'altezza dello sbarramento. Tale curva è funzione del territorio (orografia). Partendo da un modello digitale di elevazione DEM, in formato raster, si analizza la forra per strati,

facendo variare l'altezza con passo variabile Δh . Ad ogni valore " h_i " viene associato un volume " $V(h_i)$ " generando una relazione tra altezza dello sbarramento e volume di acqua invasabile. In Figura 2.4 esempio di modello digitale di elevazione DEM, (quota minima s.l.m.:310 m; quota massima s.l.m.:1150 m).

In Figura 2.5 curva dei volumi ricavata dal modello DEM.

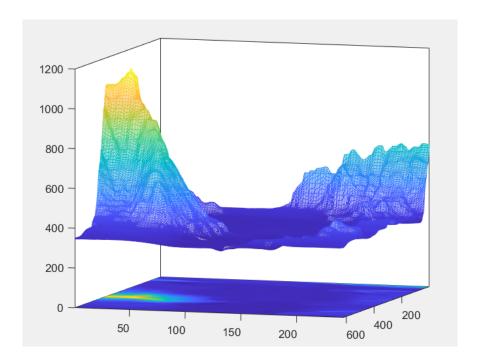


Figura 2.4 - DEM, in formato raster

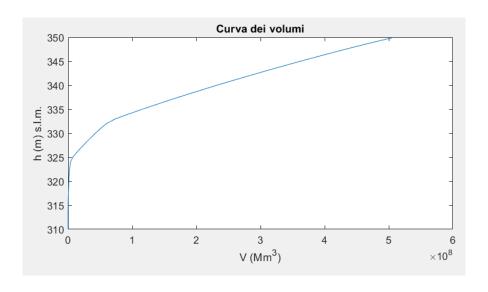


Figura 2.5 - Curva dei volumi

2.2 Tipologia di sbarramenti e classificazione

In relazione alle caratteristiche morfologiche del sito di imposta del corpo diga, allo schema di funzionamento statico, alla geometria dell'opera, alle modalità costruttive e ai materiali impiegati per la loro costruzione, si distinguono le seguenti tipologie di sbarramenti:

2.2.1 Dighe in muratura

Rappresentano opere di sbarramento murarie in calcestruzzo convenzionale, in cemento armato o elementi lapidei consolidati con legante cementizio. In relazione al comportamento statico della struttura possono essere:

1. *Dighe a gravità*; svolgono la loro funzione di sbarramento con una struttura in calcestruzzo massiccia alla base e sempre più sottile man mano che ci si avvicina alla sommità (coronamento), si oppongono alla spinta esercitata dall'acqua contenuta nel bacino grazie al proprio peso ed all'attrito/coesione tra la diga e la roccia di fondazione, per questo motivo richiedono in fondazione rocce resistenti e poco deformabili.



Figura 2.6 - Diga a gravità, Quaira (Italia)

- *Dighe ad arco* (conosciute anche come dighe a cupola); sono più sottili rispetto alle dighe a gravità. Queste strutture a differenza delle precedenti sfruttano la propria forma per scaricare parte del carico agente anche sulle spalle della diga e quindi sulla roccia posta ai lati. La pressione idrostatica viene scaricata per effetto arco sulle spalle della stretta da sbarrare. Le dighe ad arco possono essere:
- Ad arco semplice, quando la forma e i rapporti dimensionali risultano tali da permettere la resistenza alla spinta dell'acqua, del ghiaccio, delle perturbazioni varie e delle azioni sismiche, prevalentemente per mezzo dell'effetto della curvatura longitudinale che produce l'effetto arco;
- Ad arco-gravità, quando la forma e i rapporti dimensionali risultano tali da permettere la resistenza alle spinte attraverso l'azione congiunta offerta dalla curvatura longitudinale, da quella trasversale di mensola e dal peso proprio;
- ➤ A doppia curvatura, quando la forma e i rapporti dimensionali sono tali che la risposta elastica è assimilabile a quella di una lastra a doppia curvatura.



Figura 2.7 - Diga ad arco, Val Malvaglia (Svizzera)



Figura 2.8 – Diga ad arco-gravità, Ridracoli (Italia)



Figura 2.9 - Diga ad arco a doppia curvatura, Gordon (Australia)

• *Dighe a speroni;* hanno la forma tipica dello sbarramento massiccio dove vengono creati dei vani di alleggerimento. Sono caratterizzate da una struttura muraria trasversale costituita da una successione di elementi indipendenti detti speroni o contrafforti, aventi profilo trasversale triangolare e posti a contatto lungo il paramento di valle (a volte anche su quello di monte) per fornire sostegno alla parete di ritenuta e opportunamente distanziati tra loro.

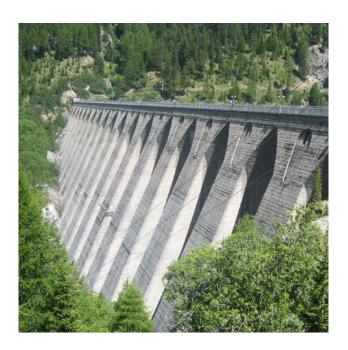


Figura 2.10 – Diga a speroni, Gioveretto (Italia)

2.2.2 Dighe in materiali sciolti

Rappresentano opere di sbarramento realizzate per mezzo di un rialzo costituito da materiali litoidi sciolti di varia granulometria e inerti costipati, dove la tenuta viene garantita da un nucleo interno costituito da materiali argillosi o da altri materiali con caratteristiche di permeabilità adeguate, e da manti impermeabilizzanti. In relazione al materiale impiegato, alle caratteristiche costruttive, e alle soluzioni progettuali di impermeabilizzazione, possono essere suddivise:

- *Dighe in terra*; costituite totalmente da terra omogenea caratterizzata da permeabilità uniforme e tale da garantire da sola la tenuta. Solitamente si impiega questa tipologia per altezze del rialzo non superiori ai 30m.
- Dighe in terra e/o pietrame, zonate con nucleo in argilla; costituite da materiali naturali di varia tipologia, organizzati e disposti in zone ben precise della sezione in funzione delle caratteristiche di permeabilità, disponendo le zone permeabili all'esterno e quelle impermeabili all'interno per la tenuta.

- Dighe in terra o pietrame con manto di rivestimento in materiali artificiali; costituite da materiali naturali di vario tipo e granulometria dove la tenuta viene garantita mediante un manto di rivestimento posto sul fianco interno.
- Dighe in pietrame alla rinfusa (scogliere) o muratura litoide a secco; costituite da blocchi litoidi di varia granulometria che formano il rivestimento e stabilizzano il rilevato in base al loro angolo di riposo e al peso proprio dell'ammasso.



Figura 2.11 - Diga in terra, Diga di Resia (Italia)



Figura 2.12 - Diga in pietrame Mattmark (Svizzera)



Figura 2.13 – Diga in terra con manto di rivestimento artificiale, Diga Zocccolo (Italia)



Figura 2.14 - Diga in pietrame alla rinfusa, Lago Verde (Italia)

2.2.3 Sbarramenti di tipo vario

Rappresentano tutte le possibili strutture di sbarramento diverse da quelle precedentemente definite, sia per funzionalità che per caratteristiche costruttive e impiego, ma aventi certe particolarità in comune.

- **Dighe di tipo misto**; realizzate in parte da strutture in muratura e in parte da materiali sciolti;
- **Diga di subalveo**; costruite da uno sbarramento affondato nel subalveo fino a raggiungere ed intercettare la falda sotterranea, in modo da fare emergere e accumularne la risorsa all'interno dell'invaso che si crea a monte;
- Casse di espansione in linea; caratterizzate da una luce a battente per i
 normali deflussi che può essere completamente riempita, durante gli eventi
 di piena in modo da poter far defluire dalla luce soltanto le portate per cui
 è stata progettata l'opera di regimazione e invasare temporaneamente a
 monte dello sbarramento, il surplus di acqua rappresentata dal volume di
 laminazione, o colmo dell'onda di piena.



Figura 2.15 - Cassa di espansione in linea

2.2.4 Traverse fluviali

Sono opere di sbarramento di un corso d'acqua di modesta entità, in particolare per quanto riguarda l'altezza, che risulta mediamente inferiore ai 10 m e che determinano un innalzamento idrico a monte, contenuto all'interno dell'alveo. In relazione all'entità dell'opera e alla funzione che le traverse devono svolgere possono essere suddivise in:

- Fisse; costituite prevalentemente da strutture murarie massiccie, ma anche mediante scogliera, al principale scopo di rialzare il livello idrico a monte per molteplici obiettivi: derivazione, attingimenti, fruizione della risora idrica.
- Mobili; costituite da opere murarie trasversali, anche di notevoli
 entità, al solito scopo delle precedenti, ma dotate di organi di
 regolazione. Tali apparati possono essere costituiti da semplici
 paratoie di tenuta a sollevamento manuale o meccaniche che
 consentono le regolazioni a scopi idroelettrici o il controllo delle
 portate di piena di un corso d'acqua.



Figura 2.16 - Traversa fluviale mobile, fiume Sele

2.3 Organi accessori

Oltre all'opera di sbarramento, la diga è composta da una serie di organi accessori che permettono il funzionamento idraulico e mantengono in sicurezza lo sbarramento. Questi organi possono essere suddivisi in: accessori per svuotare la diga; accessori per mantenere in sicurezza il corpo diga; accessori per l'adduzione.

2.3.1 Accessori per svuotare la diga

Costituiscono gli elementi idraulici necessari al controllo del livello dell'invaso e al suo svuotamento e come tali, sono soggetti al transito delle particelle solide accumulatesi nell'invaso. In base al loro collocamento all'interno della forra o del corpo diga e alle funzionalità che svolgono si dividono in:

• Scarichi di fondo: utilizzati per la manutenzione straordinaria (rimozione dei materiali da interrimento), permettono: lo scarico delle acque del bacino e le manovre di cacciata (asportazione del materiale depositato al fondo sfruttando l'effetto di trascinamento generato dal cambio di velocità in prossimità dello scarico). Sono posizionati alla quota di minima regolazione.

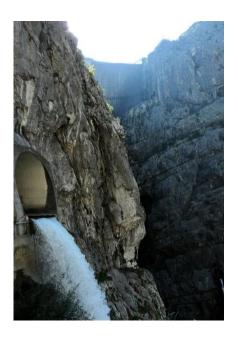


Figura 2.17 - Scarico di fondo, diga del Vajont

• Scarichi di mezzofondo: devono essere sempre presenti per dighe con altezze superiori ai 50 m o con volume maggiore di 50 milioni di m³ poiché permettono di evaquare almeno la metà della portata dello scarico di fondo. Possono essere aperti con maggiore facilità anche in caso di emergenza, consentono di scaricare una frazione significativa del volume invasato riducendo così il carico agente sullo scarico di fondo. A differenza dello scarico di fondo, a ridosso del quale si possono depositare materiali solidi che ne ostacolano l'apertura, gli scarichi superiori non hanno di fatto soggezioni.



Figura 2.18 - Scarico di mezzofondo

• Scarichi di esaurimento: vengono principalmente utilizzati per permettere il completo svuotamento dell'invaso. Sono spesso manovrabili solo quando la quota del pelo libero sia scesa circa fino alla quota dello scarico di fondo.



Figura 2.19 - Scarico di esaurimento, diga Ca'Selza

"Gli scarichi a battente, nel loro insieme con esclusione dello scarico di esaurimento, devono rendere possibile la vuotatura del 75% del volume d'invaso del serbatoio a partire dalla quota massima di regolazione, in un periodo di 3 giorni se la capacità del serbaotio è inferiore o uguale a 50 milioni di m³, ovvero in 8 giorni se la capacità del serbatoio è uguale o superiore a 200 milioni di m³, per i valori intermedi si procederà per interpolazione".

Generalmente per le dighe realizzate in muratura gli scarichi possono essere interni o esterni allo sbarrammento, mentre per quanto riguarda le dighe realizzate in materiali sciolti sono sempre posizionati esternamente al corpo diga con un'unica eccezione: nel caso in cui lo scarico possa essere cementato in una trincea scavata in roccia, se questa è presente in fondazione (evita erosione e sifonamento). Solitamente, gli scarichi esterni al corpo diga vengono realizzati prima della costruzione vera e propria dello sbarramento, in modo tale da poter utilizzare le gallerie per effettuare sondaggi preliminari, consolidare il versante prima della costruzione e il riempimento della diga e permettere il deflusso delle acque durante la fase di costruzione dello sbarramento. Gli scarichi possono essere sinteticamente descrittti come dei fori, di tipo circolare o rettangolare, all'interno del corpo diga o scavati sul fonto della valle che risultano totalmente sommersi dall'acqua e che determinano un deflusso a valle regolato da paratoie. La classica formula idraulica che permette il dimensionamento o la verifica è:

$$Q(t) = c \cdot \Omega \cdot (h(t) - h_s)^{1/2} \cdot \sqrt{2g} \quad \longrightarrow \quad Q \simeq (h(t) - h_s)^{1/2}$$

Ove:

- Q(t) è la portata evaquabile dallo scarico;
- Ω è l'area del foro (variabile in funzione dell'apertura delle paratoie);
- c è il coefficiente di deflusso;
- h(t) è l'altezza del battente;
- hs è l'altezza parte sommitale del foro;
- g è l'accellerazione di gravità.

In funzione dell'altezza del battente, le pressioni che si generano sulle paratoie di tali organi, sono decisamente elevate. Normalmente per facilitare le manovre di apertura e chiusura degli scarichi sotto i massimi carichi idrostatici, vengono utilizzati sistemi composti da più paratoie. Generalmente vengono adottate due paratoie piane a striciamento a formare una camera, la prima dotata di guarnizione a tenuta stagna, la seconda (paratoia di guardia) dotata di ruote. In alternativa possono essere utilizzate paratorie piane e a settore. In Figura 2.17 è riportato un esempio schematico del sistema apertura e chiusura con doppia paratoia.

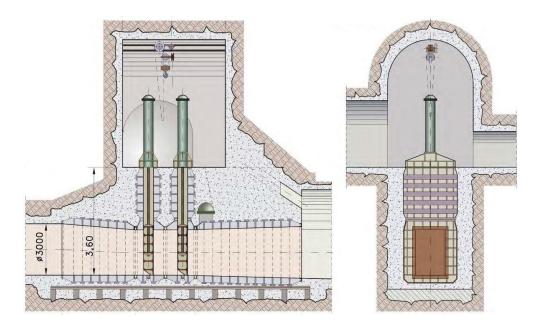


Figura 2.20 - Sistema di scarico con doppia paratoia

L'art. 17 del R.D. prevede che gli organi di manovra di uno scarico, siano controllati almeno 2 volte all'anno e possibilmente negli stati di massimo e di minimo invaso, in modo tale che in caso di emergenza gli organi siano sempre perfettamente funzionanti.

2.3.2 Accessori per mantenere in sicurezza il corpo diga

Sono gli organi idraulici a cui è demandato lo smaltimento degli eventi di piena senza causare danni alle opere e tracimazioni del coronamento della diga. "Gli

scarichi di superificie della diga devono essere dimensionati per l'onda con portata al colmo di piena corrispondente al periodo di ritorno di 1000 anni, per le dighe in calcestruzzo, e di 3000 anni per le dighe di materiali sciolti, tenendo conto dell'effetto di laminazione esercitato dal serbatoio". In funzione della tipologia e degli elementi che lo compongono possono dividersi in:

• Scarichi superficiali a soglia fissa; la capacità di scarico è data dalla formula: $Q = \mu \cdot l \cdot h^{3/2} \cdot (2g)^{1/2}$ con $Q(m^3/s)$ portata scaricata; μ coefficiente di efflusso; l(m) larghezza della soglia; h(m) altezza del carico sulla soglia. Il valore del coefficiente di efflusso è legato alla forma del profilo di tracimazione Figura 2.21, al suo grado di finitura superficiale, alle condizioni di alimentazione, e varia fra il valore 0.385 della larga soglia. fino a valori di 0.5. Per ubicazione possono essere in corpo diga, o laterali, sulle sponde al margine del coronamento.

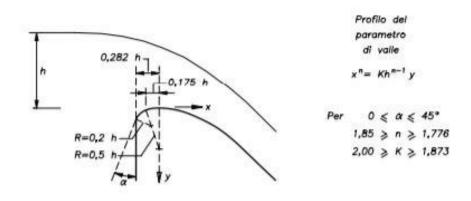


Figura 2.21 - Profilo sfioratore superficiale a soglia fissa

Quando lo spazio per la realizzazione dello sfioratore è contenuto si può ricorrere ad una soglia sagomata a becco d'anatra o a zig-zag. Bisogna però non esagerare con lo stringere troppo il becco, altrimenti il valore di Cq diminuisce rispetto al valore di una soglia rettilinea e quindi si perde il vantaggio di aver aumentato l(m) della soglia.



Figura 2.22 - Sfioratore superficiale a soglia fissa a zig-zag, Diga di Ceresole Reale

• Scarichi a sifone; Sono degli scarichi di natura semplice, soggetti man mano che aumenta il livello d'acqua e il carico idraulico, a un funzionamento prima a pelo libero, fino ad arrivare al funzionamento sotto battente in pressione con portata tendente alla portata di saturazione.

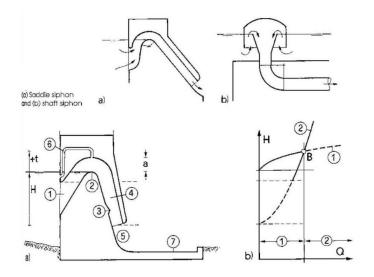


Figura 2.23 - Schema di funzionamento scarico a sifone

- Scarichi superficiali con paratoie; L' adozione di paratoie al di sopra della soglia sfiorante consente la riduzione delle dimensioni dello scarico a parità di portata nonché l'incremento del livello di ritenuta e quindi del volume di invaso disponibile. Possono essere situati, come per gli scarichi superficiali a soglia fissa, in corpo diga, o laterali, sulle sponde al margine del coronamento. In funzione della tipologia di paratoia e del meccanismo di azionamento si dividono in:
 - ➤ Paratoie a ventola sostenuta; Dispongono di una cerniera sul fondo. Possono essere sostenuti da tiranti o da sistemi di tipo oleodinamico che in fase di chiusura devono mantenere la paratoia a un'inclinazione di circa 60° rispetto all'orizzontale. Durante la fase di apertura la paratoia ruota verso il basso andando a contatto con l'acqua ed eventualmente con materiali solidi trasportati. Il movimento, essendo rotoazionale, non necessita di gargami e la tenuta viene realizzata con guarnizioni sulla parte inferiore della paratoia.

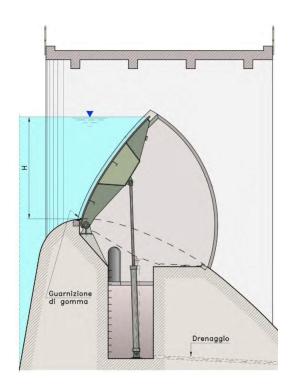


Figura 2.24 - Paratoia a ventola sostenuta

➤ Paratoie a ventola automatica; Utilizzano lo stesso meccanisco delle paratoie a ventola sostenuta, con la sola differenza che permettono di mantenere costante il livello idrico a monte, in maniera automatica, grazie alla ventola dotata di contrappeso in calcestruzzo

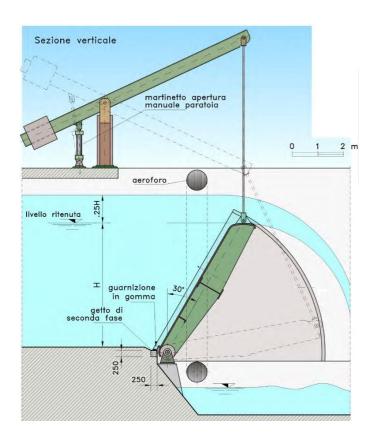


Figura 2.25 - Paratoia a ventola automatica

➤ Paratoie a settore; Formate da una porzione di superficie cilindrica a generatrici orizzontali, convenientemente irrigidita, la quale riporta la spinta statica e dinamica dell'acqua su due cuscinetti d'appoggio fissati alle spalle, attorno ai quali ruota sollevandosi (con la convessità rivolta a monte). La manovra è fatta con catene che si avvolgono sui bordi estremi; è adatto per grandi luci e si presta ad essere automatizzato in modo da conservare costante il livello a monte al variare della portata.

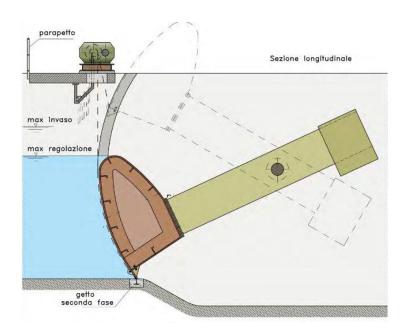


Figura 2.26 - Paratoia a settore

Paratoie piane; Sono formate da una lastra piana, generalmente rettangolare che scorre verticalmente entro due scanalature verticali parallele (gargami) che si trovano sulle pareti dello sfioratore. In genere lo sfioratore viene parzializzato in modo da non avere paratoie di dimensioni notevoli.

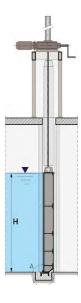


Figura 2.27 - Paratoia piana

Scarichi superficiali a calice; Gli sfioratori a calice sono dei manufatti idraulici, solitamente di forma circolare, posizionati al di fuori del corpo diga, formati da una soglia sfiorante che mediante un profilo a coppa convoglia la corrente in un pozzo seguito da una galleria di scarico suborizzontale. Possono funzionare come luce a stramazzo e come luce a battente a seconda dei carichi al di sopra della soglia. Il passaggio da un tipo di funzionamento all'altro, detto fenomeno di saturazione è dovuto a fenomeni pneumatici dovuti al trascinamento dell'aria da parte della corrente transitante. Per piccole portate il funzionamento idraulico è simile a quello delle luci a stramazzo, con la portata che risulta proporzionale al carico idraulico sulla soglia elevato a 3/2. Con l'aumento della portata, però si può passare ad un funzionamento in pressione, con la creazione di una sezione di controllo nel pozzo o nella galleria. In questo caso la portata segue una legge di efflusso a battente, ossia proporzionale al carico idraulico sulla sezione di controllo elevato ad 1/2. Il profilo a calice che si raccorda al pozzo deve evitare il formarsi di depressioni al di sotto della lama d'acqua sfiorante e ha quindi un andamento simile a quello standard degli sfioratori frontali, integrato spesso da un sistema di areazione. Questo per evitare fenomeni di "battimento" della lama, che attaccandosi e staccandosi dal profilo genera una forzante impulsiva andando a danneggiare gravemente lo sfioratore. Come per lo sfioratore superficiale a soglia fissa, anche per lo sfioratore a calice possono essere utilizzati delle forme particolari in modo da aumentare l(m) che si traduce nell'incrementare la portata tracimabile. Infine, per evitare fenomeni vorticosi, che riducono i valori di portata di progetto, si interviene parzializzando lo sfioratore con palette che fungono da divisori.

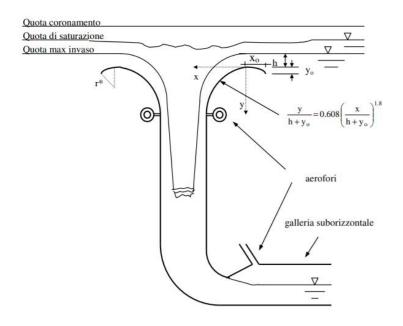


Figura 2.28 - Schema di funzionamento sfioratore a calice



Figura 2.29 - Sfioratore a calice, diga di Pontesei

Il moto a valle degli organi di regolazione è libero a superficie con velocità elevate e parimente elevati numeri di Froude. Quando lo sbocco, e quindi il deflusso, avviene in galleria, si deve provvedere con un aeroforo a rifornire di aria la corrente affinchè il moto si mantenga a superficie libera, questo per evitare che gli scarichi siano disturbati da quello che avviene a valle, oltre, a scongiurare fastidiosi problemi di sovrappressione legati al colpo di ariete. La portata d'aria Qa necessaria dipende dal numero di Froude e dalla portata Q secondo le ralazioni: $Q_a =$ $0.03Q(F-1)^{1.06}$ e $Q_a = 0.0066Q(F-1)^{1.4}$ valide, rispettivamente, quando il deflusso in galleria avvenga senza la produzione di un risalto o con un risalto. La restituzione in alveo delle acque scaricate a valle dello sbarramento richiede attenzione particolare rivolta a evitare le erosioni al piede della diga e alle pendici delle sponde vallive. L'entità di un tale pericolo dipende dalle condizioni geologiche e geotecniche dell'ammasso roccioso e da quelle idrauliche della corrente in uscita dal manufatto. Le soluzioni adottate per evitare tali problemi sono: il prolugamento dei canali di scarico fino a zone sufficientemente lontane dal piede della diga; la realizzazione di vasche (Figura 2.30) per la dissipazione dell'energia cinetica della corrente. Queste ultime sfruttando la perdita di energia conseguente alla formazione del risalto idraulico.

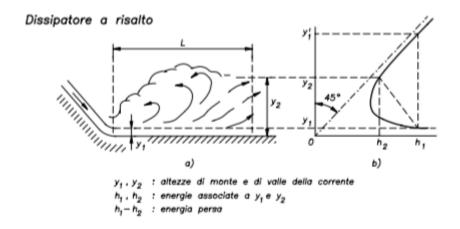


Figura 2.30 - Vasca per la dissipazione dell'energia cinetica della corrente

La loro dimensione longitudinale può essere ridotta mediante l'adozione di denti dissipatori allo sbocco del canale e/o sulla platea della vasca.

Oltre che per gli scopi appena illustrati, gli organi di scarico utilizzati per svuotare la diga, vengono utilizzati e progettati in modo da assicurare la laminazione dell'onda di piena attesa. Le azioni di regolazione dei deflussi dagli invasi regolati dalle dighe, nel corso di eventi di piena, sono definite in un Piano di laminazione predisposto dalle regioni, con il concorso tecnico del Dipartimento della Protezione civile, dei Centri funzionali decentrati, dell'Autorità di bacino del fiume Po, della Direzione generale per le dighe del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, dell'AIPo, degli Enti regolatori dei Grandi laghi e dei Gestori degli invasi. Principalmente esistono tre modi per effettuare la laminazione dell'onda di piena per mezzo degli scarichi:

- ➤ Laminazione statica: l'operatore non interviene direttamente sulla diga (attivando lo scarico di fondo, ma "lascia alla natura" il compito di laminare per mezzo del ciglio sfiorante). Nella laminazione statica l'unica portata uscente sarà quella sfiorata Qs.
- ➤ Laminazione pseudodinamica: mediante sistemi metereologici e di afflussi-deflussi per stimare una previsione dell'evento di piena, si avvisano i gestori della possibilità di tale evento con almeno 2/3 giorni di anticipo (in funzione della velocità degli scarichi di fondo dell'opera diga); essi si attivano immediatamente nello svuotamento preventivo mediante scarico sotto battente di una quantità predefinita di volume. Durante la piena, lo scarico di fondo sarà chiuso e l'unica portata uscente sarà quella sfiorata.
- ➤ Laminazione dinamica: a differenza di quella pseudo dinamica, prevede di intervenire non solo prima della piena ma anche durante l'evento, aprendo gli scarichi sotto battente e lasciandoli aperti finché h(t) non è maggiore di h*, ove h*=hsfioro=hregolazione (cioè fino a che il ΔV, di cui era stata preventivamente svuotata la diga a partire dalla condizione di diga piena, non viene restituita dall'evento di piena stesso).

2.3.3 Accessori per l'adduzione.

L'adduzione da un lago artificiale viene realizzata tramite un torrino di presa interno all'invaso. La torre dotata di bocche di presa dislocate a differente altezza, per consetire la derivazione di acqua da differente quota, sia in funzione della quota di invaso e sia dalle caratteristiche fisiche, chimiche, e batteriologiche, permette di incanalare l'acqua all'interno di condotte per poi essere utilizzata per molteplici scopi (irriguo, potabile, idroelettrico) a valle dello sbarramento.

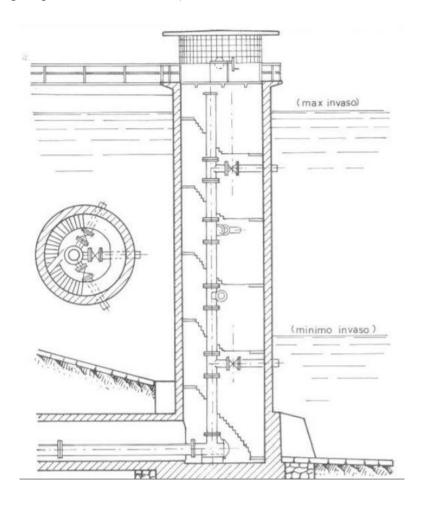


Figura 2.31 - Schema funzionale torrino di presa

Generalmente su questi organi è presente un dispositivo elettromeccanico (sgrigliatore) che svolge la funzione di rimuove i detriti accumulati contro le griglie a barre. Le griglie vengono installate all'imbocco delle tubazioni di presa in modo da evitare la captazione di materiale solido e l'ostruzione delle tubazioni di presa e di trasporto.

2.4 Particolari costruttivi e strumenti per il controllo

Non è azzardato affermare che il buono o cattivo esito di una diga non dipende solamente dai mezzi più o meno raffinati impiegati per calcolarla, quanto dal modo con cui è stata costruita e dall'applicazione di un complesso di provvedimenti atti a garantirne la funzionalità e la conservazione.

2.4.1 Provvedimenti costruttivi dighe in muratura.

Primo fra tutti, per la sua importanza basilare, è il problema delle fondazioni, sotto il duplice aspetto delle indagini per procurarsi le informazioni occorrenti, e dei lavori di correzione e consolidamento, che consistono sostanzialmente nelle iniezioni di cemento. Seguono i provvedimenti di difesa dell'opera contro le azioni meccaniche e termiche (azioni dell'acqua e del gelo, variazioni di temperatura, ritiro dei calcestruzzi, ecc.), indi le modalità di esecuzione ed infine l'organizzazione del cantiere di costruzione. Contro le fughe d'acqua e le permeazioni diffuse si provvede curando di realizzare una struttura il più possibile impermeabile, soprattutto nell'immediato contatto con l'acqua e, per intercettare le eventuali filtrazioni, si ricava nel corpo della diga un sistema drenante costituito da fori verticali di piccolo diametro (da 20 a 30 cm), distanti fra loro qualche metro. A intervalli di quota opportuni (di solito da 15 a 25 m) i fori sono interrotti da cunicoli orizzontali per l'ispezione e la raccolta delle acque d'infiltrazione, le quali vengono misurate (per capire se la diga sta assorbendo più acqua di quella preventivata da progetto) e quindi scaricate a valle della diga.

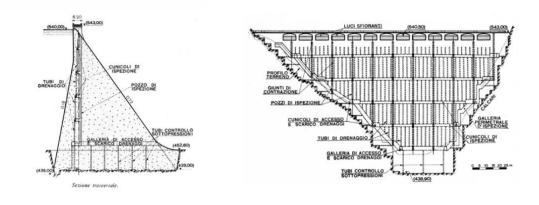


Figura 2.32 - Particolari costruttivi

Nelle dighe di calcestruzzo si verificano sforzi di natura termica provocati da due cause diverse, e cioè da fenomeni di ritiro del cemento durante la presa e dalle vicende di temperatura durante l'esercizio. Il fenomeno del ritiro, particolarmente preoccupante nelle grandi masse, proviene dal fatto che le reazioni chimiche che accompagnano la presa dei leganti sono esotermiche: succede quindi che in un tempo relativamente breve si manifestano nell'interno del getto di calcestruzzo sensibili innalzamenti di temperatura, che possono raggiungere anche una trentina di gradi sopra la temperatura di costruzione. A questa fase ne succede un'altra di progressivo raffreddamento che si manifesta in modo più rapido alla superficie rispetto all'interno. Sorgono così sforzi termici di entità rilevante i quali tendono a generare pericolose fessurazioni. Lo stesso pericolo nasce durante la stagione fredda per eccessivo abbassamento della temperatura di fronte a quella di costruzione. Per ovviare a tali inconvenienti le dighe di muratura si costruiscono a conci o blocchi separati da giunti che successivamente, quando la massa del calcestruzzo ha raggiunto il livello termico medio dell'ambiente esterno, vengono intasati mediante iniezioni di cemento. Questo provvedimento è indispensabile nelle dighe a pianta arcuata, per rendere operante l'effetto arco.

2.4.2 Strumenti per il controllo delle dighe

Le dighe di ritenuta sono continuamente soggette a mutazioni nelle caratteristiche fisico-chimiche del materiale di costruzione e a deformazioni e a spostamenti nello spazio che danno luogo a variazioni più o meno sensibili nel loro funzionamento statico. Numerose sono infatti le cause che agiscono direttamente o indirettamente sulla struttura: peso proprio; carico idrostatico; spinta dei ghiacci; pressioni interstiziali e sottopressioni; movimenti sismici; variazioni di temperatura dell'aria e dell'acqua; variazioni di temperatura dovute allo sviluppo di calore durante la presa e l'indurimento del calcestruzzo; assestamento e costipamento dei materiali nelle dighe di terra e di pietrame; spostamenti e cedimenti dei piani di fondazione e d'imposta, ecc. Da ciò la necessità di accurate misure di controllo atte a seguire il comportamento della struttura in funzione del tempo e delle varie condizioni ambientali e del carico. Questo non soltanto agli effetti della sicurezza, ma anche per verificare quanti e quali dei risultati ottenuti in fase di progettazione abbiano riscontro con la realtà. Le misure per il controllo impiegano sostanzialmente i

normali mezzi della fisica tecnica, della scienza delle costruzioni e della topografia (strumenti meccanici, ottici, elettrici ed acustici). Le condizioni di ambiente nonché la richiesta continua delle misure hanno tuttavia portato alla formazione di una specializzazione che va sempre più affermandosi con l'impiego di particolari attrezzature e metodi di elaborazione. Nei primi anni di funzionamento, una diga e la sua fondazione sono soggette a deformazioni elastiche e plastiche: queste ultime tendono gradualmente ad estinguersi, quelle elastiche invece si rinnovano con continuità. Dato che le cause prime delle deformazioni, nelle condizioni di regime, sono l'alternarsi degli invasi e svasi del serbatoio ed il susseguirsi delle variazioni termiche stagionali, anche le deformazioni della struttura seguono una vicenda analoga combinata. Il controllo del comportamento statico globale di una diga viene effettuato mediante la misura degli spostamenti di vari punti della struttura, generalmente tramite l'utilizzo di un penolo rovescio e di un teodolite, Figura 2.33. Poichè tali spostamenti sono l'espressione della perdurante stabilità dell'opera, occorre constatare nel complesso diga-fondazione l'esistenza di movimenti elastici sistematici a ciclo chiuso. Circa l'entità di tali spostamenti, essi variano da caso a caso: pochi millimetri nelle dighe murarie a gravità; anche diversi centimetri nelle dighe ad arco e nelle dighe di materiali sciolti.





Figura 2.33 - Strumenti per il controllo delle dighe

2.5 Principali cause di incidenti

2.5.1 Overtopping

Con il termine "Overtopping" si intende definire il generico fenomeno per cui il livello all'interno del bacino supera la capacità massima dello stesso, o in alternativa sorpassa l'altezza di coronamento della diga. Le cause incitanti sono da ricercare nell'inadeguatezza delle potenzialità di smaltimento associate allo sfioratore superficiale ("Insufficient spillway capacity") oppure a piene di entità decisamente superiori ai valori di progetto dell'opera idraulica ("Extreme flood"). A tali cause si aggiunge la probabilità di movimenti differenziali in corrispondenza della cresta della diga (punto sommitale dello sfioratore), ovvero "Settlement of the dam crest". In generale, tali condizioni insorgono nel momento in cui si assiste ad un aumento improvviso e repentino del livello idrico; chiaramente ciò avviene durante periodi di pioggia intensa. I risultati più catastrofici si hanno quando tali conseguenze dipendono da fenomeni impulsivi quali flashfloods, frane all'interno del bacino (è il caso tristemente noto del Vajont) o addirittura collassi di una o più dighe a monte. L'Overtopping, che in prima analisi risulta responsabile di un terzo degli insuccessi idraulici a livello mondiale, può compromettere rapidamente l'integrità strutturale della diga andando a erodere la parete esterna della stessa;in tal modo, si può verificare lo sganciamento della struttura idraulica rispetto alle sponde del bacino.



Figura 2.34 – Overtopping, Lake Delhi Dam

In base alle modalità di collasso, ci si può subito rendere conto di come le dighe in terra siano le principali esposte a tale rischio. La predisposizione di tali dighe 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

In particolare, quest'ultimo fattore dovrebbe essere integrato direttamente in fase progettuale, data la notevole capacità di una coltre vegetale di contenere o perlomeno rallentare i fenomeni erosivi. Infatti, nonostante non sia sempre possibile impedire l'overtopping, uno strato vegetativo di spessore e caratterische adeguate potrebbero quantomeno consentire di ritardare il collasso della struttura di un tempo sufficiente a completare le procedure di evacuazione. Tale accorgimento richiede una manutenzione costante, soprattutto a livello di irrigazione, a meno che la diga non sia stata costruita in un ambiente caratterizzato da un clima umido e dunque che assicuri uno sviluppo omogeneo del manto erboso. Sul piano 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. A sostegno dell'azione naturale esercitata dal manto erboso, nel campo dell'Ingegneria naturalistica si stanno diffondendo sistemi di rinforzo sotto forma di materassi sintetici ("turf reinforcement", vedasi Figura) con la conseguente costruzione di un supporto di crescita alla vegetazione e al fine di incentivare il potere di ritenuta strutturale. Al contrario, è opinione comune che le dighe realizzate in calcestruzzo possano offrire resistenza maggiore ai fenomeni di overtopping, considerando anche il fatto che esse richiedono tradizionalmente una fondazione in roccia compatta; l'unione di queste tecniche sembra quindi costituire una barriera efficace contro l'erosione. Non è da trascurare l'eventualità che si formino fratture diffuse in tutto il corpo frana, che rischierebbero di costituire un percorso preferenziale per l'acqua. In caso di overtopping di una 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. Inoltre, la turbolenza può essere sostenuta dalla variazione di materiale di copertura della superficie o da un cambiamento di scabrezza. Come introdotto in precedenza, anche le zone a scarsa vegetazione costituiscono punti di sviluppo privilegiato dell'erosione. Dunque, si assiste alla formazione di una serie di "headcut" di dimensioni contenute, che tendono a progredire dalla sponda alla valle per poi aprirsi anche all'interno, fino a originare una breccia in corrispondenza della cresta della diga (Figura 2.33). Ricoprire col cemento la sommità potrebbe contribuire a rallentare il fenomeno, senza intralciarne nascita e sviluppo; addirittura, non è da scartare l'opinione che tale accorgimento possa degenerare in un distacco della copertura stessa, che comporterebbe rischi perfino maggiori.

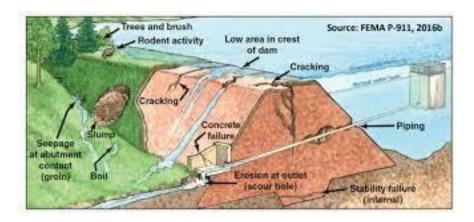


Figura 2.35 – Tipici processi di collasso

Invece, la vulnerabilità delle dighe in calcestruzzo è costituita dalle fondazioni in roccia, che richiedono un'analisi geologica approfondita. Altro elemento di compromissione è rappresentato dai parapetti normalmente deputati al contenimento delle onde di superficie e che in caso di erosione localizzata e conseguente crollo, rischiano di esporre il resto della struttura ad un carico idraulico ancora maggiore. Le caratteristiche e l'efficienza dello sfioratore superficiale influiscono profondamente sull'insorgenza di fenomeni di overtopping, come anche la pulizia dai detriti in grado di ostruire le vanne sommerse o lo sfioratore stesso. In Nord-America, un metodo risoltivo spesso usato è quello di fare ricorso ai cosiddetti "log booms", ovvero una barriera artificiale capace di raccogliere

tronchi e altro materiale galleggiante a monte dell'invaso, limitandone il deposito in prossimità dello sfioratore. Nonostante, il rivestimento in cemento e l'impiego di materiale più duttili possano 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 2.35). La liberazione di un ingente volume d'acqua diventa infine inevitabile.

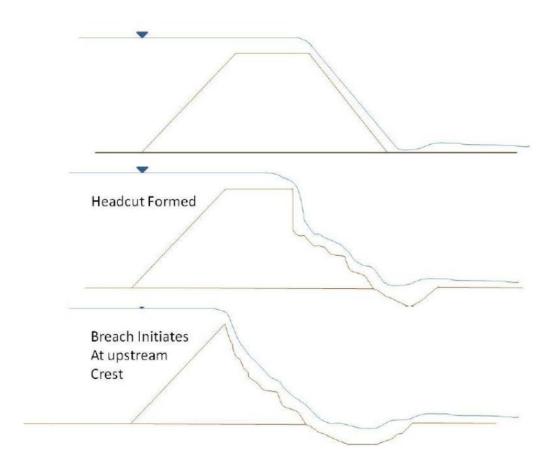


Figura 2.36 – Processo erosivo che porta al collasso della parte sommitale

Risulta pertanto evidente come, nell'ambito delle dighe in terra sottoposte al rischio di overtopping, le opere di contenimento dovrebbero garantire un'adeguata impermeabilizzazione delle fondazioni, concentrandosi meno sulla zona dello sfioratore.

2.5.2 Earthquake

Le dighe sono progettate per assorbire le azioni orizzontali che invece tendono a mettere in crisi gli edifici. Da questa considerazione perviene la scarsa probabilità di collasso associata ad una grande diga per effetto del sisma (ovvero 1 su 10000). In presenza di un bacino sottoposto ad azione sismica, i rischi riguardano diversi ambiti, non soltanto quello strutturale. In particolare, si evidenziano:

- Scuotimento del terreno con relativa distorsione in tutto il sistema della diga, comprensivo di condotte forzate ed equipaggiamenti meccanici ed elettrici.
- Fratture profonde delle fondazioni con conseguenti deformazioni del corpo diga.
- Spostamento del terreno sul fondo del bacino che conserva la capacità di generare onde di superficie e versamenti.
- Generazione di frane che possono danneggiare le vanne, gli sfioratori, le linee e i trasformatori elettrici, nonché gli edifici operativi.
- 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.
- Liquefazione con movimenti differenziali dell'opera. Di un terreno con carattere non coesivo.
- Spostamento in controfase delle spalle della diga, con conseguente rischio di crollo.

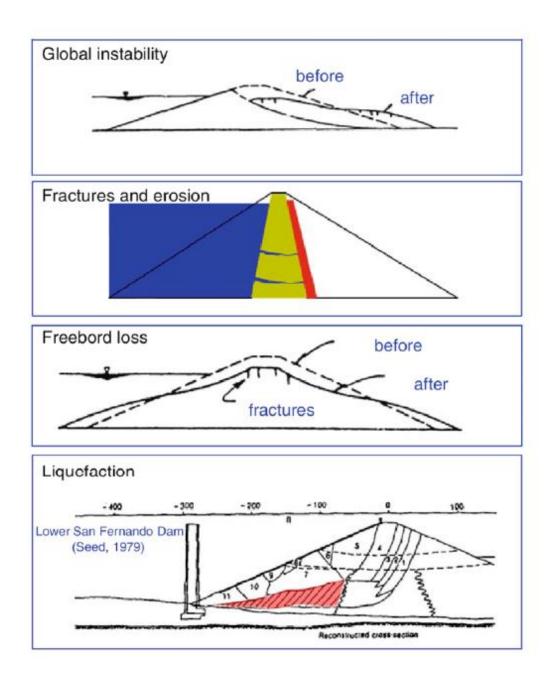


Figura 2.37 – Effetti del sisma

In ogni caso è da precisare che il rischio maggiore connesso all'azione sismica rimane il movimento sussultorio del terreno e le sue conseguenze dal punto di vista strutturale, in quanto tendenzialmente gli invasi a priori vengono 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). Nell'ambito delle dighe in calcestruzzo, l'azione sismica è responsabile 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)



Figura 2.38 – Erosione interna per problemi di filtrazione

2.5.3 Internal Erosion

Il problema dell'erosione interna affligge in modo privilegiato gli invasi in terra, poiché quest'ultima, al netto di interventi di compattazione e impermeabilizzazione, si dimostra tendenzialmente 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 e non stabile verso l'alto). Tuttavia, è inapppropriato ridurre il fenomeno all'ambito delle dighe in terra, dato che anche quelle realizzate in cemento armato e roccia spesso poggiano su uno strato di fondazione in materiale sciolto (dando origine al fenomeno di Piping). 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, che possono essere anche associate ad un rischio peculiare a seconda della predisposizione dell'opera a subire per lo più specifiche criticità. 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 gradatamente crea un canale erosivo rimuovendo materiale che rimane in sospensione e contribuisce a genrare ulteriore turbolenza nel flusso, con conseguente innesco sempre più pronunciato. Nel momento in cui l'apertura raggiunge la superficie del paramento esterno della diga emergono le criticità; fondamentalmente il problema consiste nel fatto che, quando il fenomeno risulta visibile, esso era già cominciato da tempo all'interno del paramento. Nel complesso il suo impatto sull'opera è significativo per le strutture in terra, ma potrebbe essere contrastato anche in questo caso tramite opportune precauzioni di compattazione del materiale impiegato. Le cause che detrminano il Piping sono da rintracciare nella suscettibilità del terreno all'erosione (in particolare risulta particolarmente sensibile il "dispersive soil", ovvero materiale granulare a bassa coesione) e lo stato di sforzo all'interno del paramento, con pecualiare riguardo allo sforzo di taglio agente su ogni elemento infinitesimo. Quest'ultimo infatti ha la capacità di rompere con relativa facilità i deboli legami elettrostatici e meccanici tra le particelle del terreno. A queste condizioni predisponenti, si aggiungono alcuni fattori cruciali 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, altrimenti, si arresterebbe immediatamente). Il fenomeno di "Scour" risiede sempre nell'ambito dell'erosione, ma in questo caso l'azione nociva si registra in presenza di flussi d'acqua particolarmente turbolenti intorno a elementi che ne aumentano maggiormente il numero di Reynolds (e con esso l'entità della turbolenza). È la situazione tipica delle pile da ponte, che non a caso si dimostrano considerevolmente sensibili a questo tipo di criticità.

Per la precisione, l'erosione si verifica quando il flusso idrico incontra un ostacolo che lo induce a cambiare direzione e ad accelerare; in questa fase, parte del materiale granulare in corrispondenza dell'ostruzione può finire in sospensione.

I punti che possono costituire un innesco privilegiato dello "Scour" sono da reperire nel settore 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, ad esempio, una piattaforma operativa a poca distanza dal paramento della diga. In modo analogo agli altri esempi di erosione, la sua entità dipende strettamente dalla velocità del flusso e in particolar modo dalla turbolenza dello stesso.

3 DATABASE DIGHE

Come abbiamo visto le dighe sono considerate uno degli strumenti più importanti per promuovere l'economia dei paesi sottosviluppati. È opinione diffusa che la possibilità di produrre energia elettrica a bassi costi, associata al controllo delle acque per l'agricoltura e alla prevenzione delle inondazioni, possa dare origine a quell'iter virtuoso in grado di fare decollare l'economia dei paesi più poveri. Un possibile incidente su queste maestose opere potrebbe generare miglia di morti e spazzare via intere città. Per questo motivo, sempre più associazioni e università hanno prodotto e continuano a produrre database, ad accesso libero, al fine di aiutare la comunità scientifica e gli organi di controllo ad avere una panoramica generale dello stato attuale delle dighedi tutto il mondo. Inoltre, la possibilità di raccogliere quante più informazioni sugli incidenti accaduti e documentati, sulla base degli errori commessi in fase di progettazione e realizzazione di aggiornare, consente di integrare e innovare le attuali tecniche costruttive e progettuali.

Nei prossimi paragrafi verranno analizzati i principali database utilizzati per lo studio statistico di affidabilità che sarà opportunatamenete affrontato nel capitolo 4. I database utilizzati fanno riferimento alle sole dighe americane, questo perchè la maggior parte degli incidenti documentati (circa il 90% del database generale degli incidenti mondiali) sono da ricondursi a dighe americane.

3.1 Database NPDP

La sigla "NPDP" è l'acronimo di "National Performance of Dams Programs", programma sviluppato e curato direttamente dall'Università di Stanford. Esso è stato ideato all'inizio degli anni Novanta e presentato ufficialmente nel 1994, continuando ad essere aggiornato annualmente con nuovi dati inerenti alla distribuzione statunitense e mondiale delle dighe (inoltre, sono state annessi esempi di insuccessi idraulici di vario tipo). L'obiettivo è quello di offrire ai professionisti del settore uno strumento di consultazione che monitori lo stato in servizio di dighe e sbarramenti, garantendo un'ampia documentazione multimediale correlata agli stessi. 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 XVIII secolo
- La più antica diga documentata risale al 1640 (Old Oaken Bucket Pond Dam in Massachusetts)

Il database si suddivide in sei sezioni principali (Figura 3.1) Le ultime due, ovvero "Digital Library" e "Photo Library" accolgono rispettivamente le pubblicazioni scientifiche che la Stanford University 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 una serie di elementi di analisi post-incidente che non sono direttamente correlati a incidenti realmente avvenuti e documentati nel database, ma che possono costituire una solida base di studio dei fenomeni generali che conducono ad una determinata tipologia di insuccesso idraulico.

Tuttavia, le due directory di maggiore interesse ai fini della presente analisi restano le prime due, poiché consentono di mettere a confronto la popolazione totale di dighe indicizzate all'interno del NPDP e il campione di incidenti estratto dalla stessa.

3.2 Database NID

Con la sigla NID si indica il "National Inventory of Dams", un database statunitense di dighe e sbarramenti, comunemente ritenuto (in questo ambito di ricerca) essere la fonte più completa e affidabile a livello nazionale negli USA. È stato sviluppato dall'Esercito grazie all'opera della Commissione interna denominata "Corps of Engineers". 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.

3.3 Database dighe USA

Dalla sovrapposizione dei due database NPDP e FEMA nasce il database dighe USA, in grado di congiungere al suo interno un numero consistente di dighe costruite su tutto il territorio americano. Il nuovo database è consultabile mediante foglio excel (figura 3.9), dove è possibile visualizzare le seguenti informazioni:

	,					 							
Nome	Stato	¥	Provincia	۳	Tipologia completa -	Tipologia primaria	Ris	schio 💌	Purpose	Altea	za 🔻	Bacino 💌	Anno costruzione
BOY SCOUT	United S	tates	Alabama				Lo	w	Recreation		11.3	1038591.7	197
LAUPEROUSE	United S	tates	Alabama				Un	nknown	Recreation		5.8	109779.9	195
BOB PACE	United S	tates	Alabama				Un	nknown	Fish and Wildlife Pond		5.2	236828.5	197
LAKE MURIEL	United S	tates	Alabama				Lo	w	Irrigation		4.9	205991.5	196
COOPER NUMBER ONE	United S	tates	Alabama				Un	nknown	Fire Protection, Stock, Or Small Fish Por	10	4.3	135683	196
RAYNAGUA	United S	tates	Alabama				Lo	w	Recreation		5.2	242995.9	196
J P BERTOLLI	United S	tates	Alabama				Un	nknown	Recreation		4.6	65374.5	195
PATTERSON	United S	tates	Alabama				Lo	w	Irrigation		10.4	2497800.8	195
JOHN Q KENDRICK	United S	tates	Alabama				Un	nknown	Recreation		6.4	103612.5	196
LAKE GREENVILLE	United S	tates	Alabama				Lo	w	Recreation		4.6	498326.7	195
ALEXANDER	United S	tates	Alabama				Un	nknown	Recreation		4.3	152951.8	196

Figura 3.1 - Foglio excel database completo NPDP+FEMA

Alla voce "Nome", prima colonna, il nome della diga; alla voce "Stato", seconda colonna, l'appartenenza statunitense; alla voce "Provincia", terza colonna, l'esatta collocazione dello sbarramento; alla voce "Tipologia completa", quarta colonna, la tipologia specifica del corpo diga; alla voce "Tipologia primaria", quinta colonna, le indicazione generiche sulla tipologia del corpo diga; alla voce "Rischio", sesta colonna, le informazioni sull'eventualità di subire un danno; nella settima colonna "Purpose" gli scopi per il quale viene sfruttato l'invaso; alla voce "Altezza", ottava colonna, l'altezza dello sbarramento; alla nona colonna "Bacino" i metri cubi di acqua contenibili dall'invaso; alla decima e ultima colonna "Anno di fondazione" l'anno di messa in esercizio/completamento della diga.

Il database NPDP+FEMA non è altro che l'integrazione del database NPDP per mezzo del database FEMA. Il database ad oggi contiene 70561 dighe al suo interno. Purtroppo, buona parte di esse presenta numerose voci incomplete. Questo però non nè pregiudica l'utilità ai fini statistici, fornendo un valido supporto per l'approccio di nuovi studi. A seguire vengono riportati una serie di dati utili a comprendere le potenzialità del database e a fotografare la situazione attuale delle dighe americane.

3.3.1 Distribuzione per Stato

Stato	Numero di dighe
Alabama	2236
Alaska	97
Arizona	355
Arkansas	1232
California	1518
Colorado	1877
Connecticut	754
Delaware	89
Florida	901
Georgia	4719
Hawaii	138
Idaho	461
Illinois	1516
Indiana	1144
Iowa	3379
Kansas	1440
Kentucky	1058
Louisiana	558
Maine	654
Maryland	346
Massachusetts	1619
Michigan	941
Minnesota	2106
Mississippi	3554
Missouri	3990
Montana	5860
Nevada	519
New Hampshire	668
New Jersey	871
New Mexico	535
New York	2023
North Carolina	3439
North Dakota	873
Ohio	3176
Oregon	972
Pennsylvania	1601
Rhode Island	253
South Carolina	2431
South Dakota	2523
Tennessee	1265
Utah	838
Vermont	394
Virginia	1649
Washington	792
West Virginia	574
Wisconsin	1190
Wyoming	1433
,	

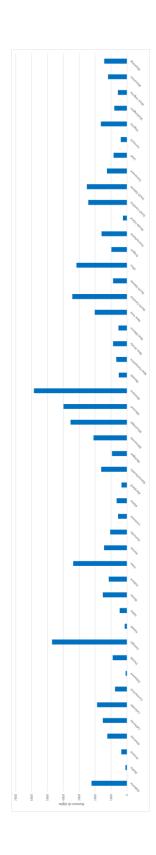


Figura 3.2 – Numero di dighe per Stato

3.3.2 Distribuzione per Anno di costruzione

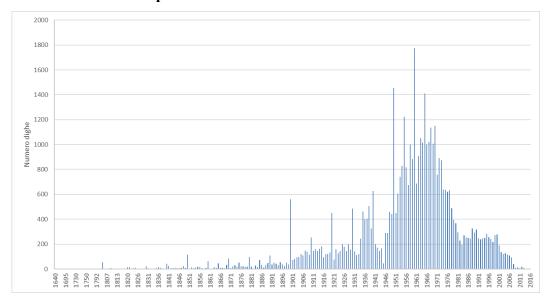


Figura 3.3 – Numero di dighe costruite per anno, dal 1640 al 2016.

Per 24006 dighe all'interno del database non si conosce l'anno di costruzione.

3.3.3 Distribuzione per Tipologia

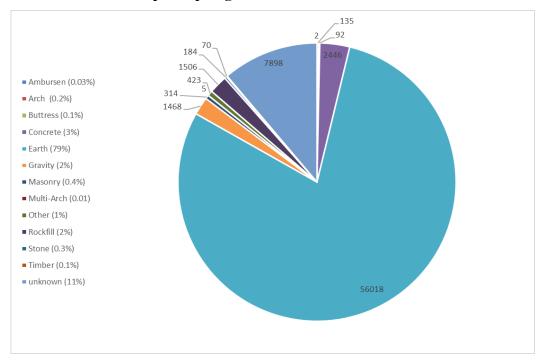


Figura 3.4 – Numero di dighe per tipologia costruttiva dello sbarramento

3.3.4 Distribuzione per Funzione

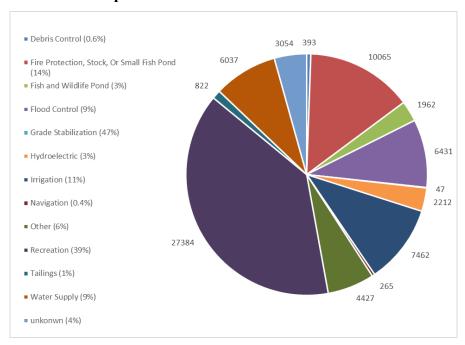


Figura 3.5 - Numero di dighe realizzate per funzionalità

3.3.5 Distribuzione per Volume massimo invasabile

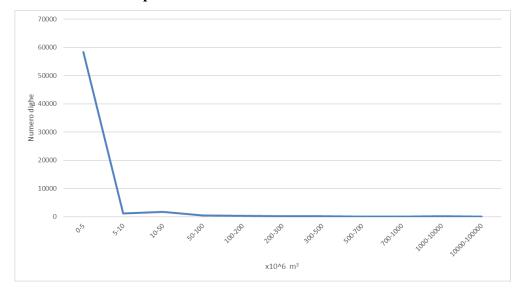


Figura 3.6 – Numero dighe per volume massimo invasabile

Per 8089 dighe all'interno del database non si conosce il volume massimo invasabile.

3.3.6 Distribuzione per Altezza

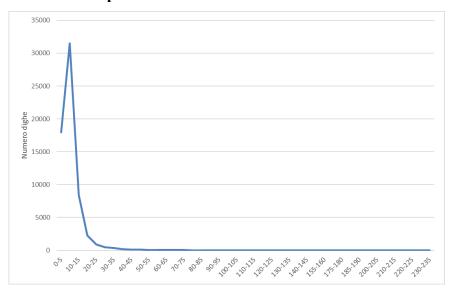


Figura 3.7 - Numero di dighe per altezza

Per 7757 dighe all'interno del database non si conosce l'altezza dello sbarramento.

3.3.7 Distribuzione "Piccole dighe" e "Grandi dighe"

Il criterio adottato per classificare le dighe come piccole o grandi si basa sull'altezza dello sbarramento. Con il termine "Grande Diga" s'intende una diga che abbia un'altezza di almeno 15 metri dalla fondazione fino alla cresta. Ovviamente per le dighe sotto i 15 metri viene attribuito il termine "Piccola Diga".

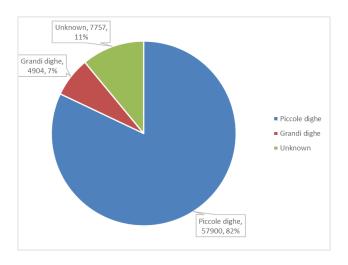


Figura 3.8 - Distribuzione "Piccole dighe" e "Grandi dighe"

3.4 Database incidenti (analisi dighe USA)

La banca dati generale che raggruppa gli incidenti avvenuti alle dighe di tutto il mondo, realizzata tramite file excel, contiene 3666 incidenti documentati. La preminenza dei dati è legata all'America del Nord, arrivando a sfiorare il 90% della popolazione totale; questa incidenza si spiega con il fatto che gli incidenti registrati provengono dal database NPDP; infatti, il database contiene 3223 incidenti noti e riferiti alle sole dighe statunitensi. Purtroppo, come per il database NPDP+FEMA, (paragrafo 3.3) anche nel database incidenti dighe, si hanno numerose voci incomplete.

Il database è così strutturato: le prime sette colonne (figura 3.17) contengono informazioni generali già disponibili e consultabili in buona parte nel database NPDP+FEMA. Nelle restanti sei colonne (figura 3.18) è possibile visualizzare: alle voci "Causa originale", "Causa razionalizzata generica" e "Causa razionalizzata generica" informazioni generiche e specifiche sulla tipologia e sulle cause dell'incidente; alla voce "Anno di incidente" l'anno in cui si è verificato l'incidente; alla voce "Anno di fondazione" l'anno di costruzione/messa in esercizio della diga; infine, alla voce "Età" l'arco temporale trascorso tra l'anno di costruzione/messa in esercizio e l'anno in cui si è verificato l'incidente.

Nome diga 💌	Stato 🗉	Provincia 🔳	Tipologia completa 🕒	Tipologia primaria 🔳	Altezza [m] 💌	Bacino [mc] 🔳
Baldwin	United States		Earth	Earth	71	1100000
Teton	United States		Earth	Earth	93	356000000
Austin	United States	Texas	Masonry	Masonry	5.9	43171.9
Austin	United States	Pennsylvania	Concrete	Concrete	15.2	43171.9
Gibson	United States	Montana	Concrete; Arch	Concrete	60.6	122000000
Morris Sheppard	United States	Texas	Gravity	Gravity	57.9	703000000
Pacoima	United States	California	Concrete Arch	Concrete	111.3	4658861

Figura 3.9 - Prima parte dei dati contenuti nel database incidenti dighe

Causa originale	Causa razionalizzata specifica 📧	Causa razionalizzata generica 📧	Anno incidente 💌	Anno fondazione 📧	Età 💌
IE.	Varie	Others	1963	1951	12
IE.	Mistakes in building	Structural problems	1976	1975	1
Sliding	Sliding in dam body	Quality problems	1900	1893	7
Sliding	Sliding in dam body	Quality problems	1911	1909	2
Overtopping Extreme flood	Insufficient spillway capacity	Overtopping	1964	1926	38
Sliding of spillway	Sliding in dam body	Quality problems	1986	1941	45
Seismic	Earthquake	Earthquake	1971	1929	42
					-

Figura 3.10 - Seconda parte dei dati contenuti nel database incidenti dighe

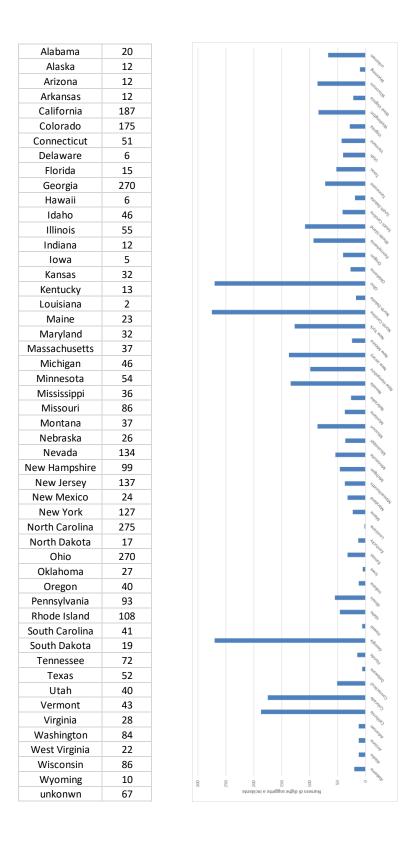


Figura 3.11 – Numero di incidenti per Stato (dighe USA)

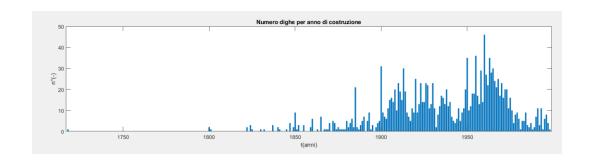


Figura 3.12 - Numero dighe soggete ad incidenti per anno di costruzione (dighe USA).

Per 1673 dighe all'interno del database non si conosce l'anno di costruzione/messa in esercizio. La diga più antica soggetta a incidente, presente all'interno del database risale al 1718. Invece, la diga più giovane risulta realizzata nel 1999.

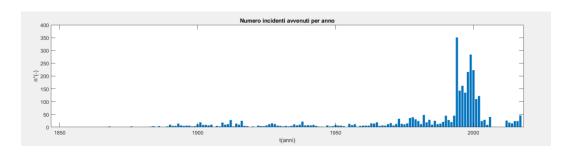


Figura 3.13 - Numero di incidenti avvenuti per anno, dal 1850 al 2017. (dighe USA)

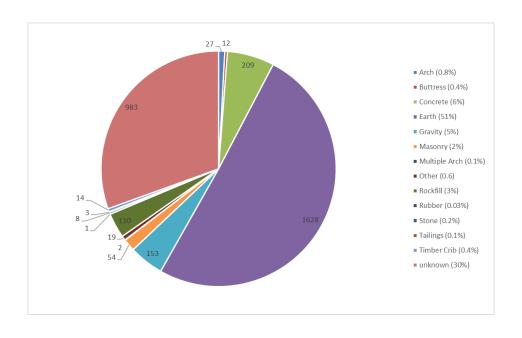


Figura 3.14 – Distribuzione incidenti per Tipologia costruttiva (dighe USA)

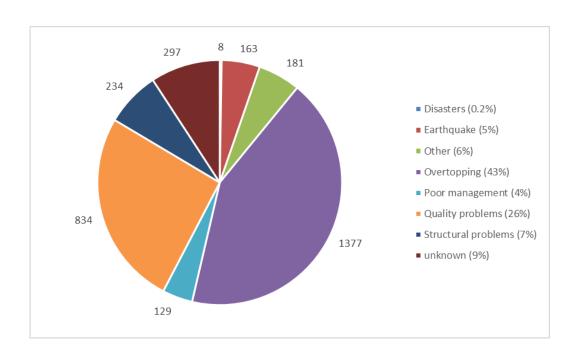


Figura 3.15 - Numero di incidenti per causa generica (dighe USA)

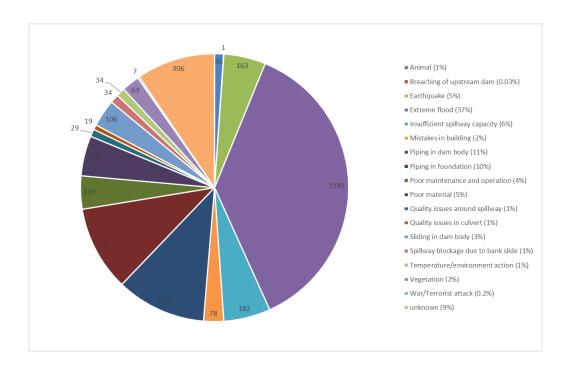


Figura 3.16 - Numero di incidenti per causa specifica (dighe USA)

3.5 Distribuzione incidenti su "Piccole" e "Grandi" dighe (analisi dighe USA)

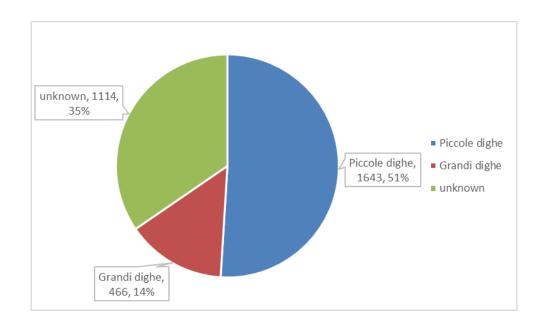


Figura 3.17 – Distribuzione incidenti su "Piccole dighe" e "Grandi dighe" (dighe USA)

3.5.1 Distribuzione incidenti "Piccole dighe" USA

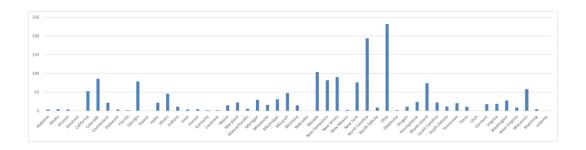


Figura 3.18 – Numero incidenti per stato ("Piccole dighe" USA)

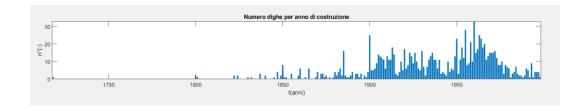


Figura 3.19- Numero "Piccole dighe" USA soggete ad incidenti per anno di costruzione

Per 554 "Piccole dighe" non si conosce l'anno di costruzione/messa in esercizio. La diga più antica soggetta a incidente, appartenente alla famiglia delle "Piccole dighe", risale al 1718. Invece, la più giovane risulta realizzata nel 1999.

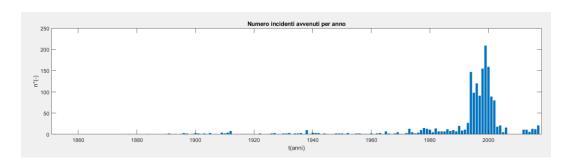


Figura 3.20 - Numero di incidenti avvenuti per anno, dal 1850 al 2017. ("Piccole dighe" USA)

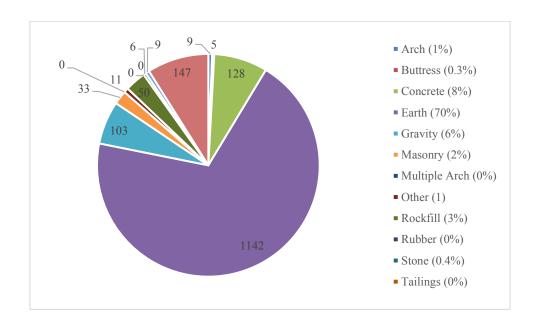


Figura 3.21 - Distribuzione incidenti per Tipologia costruttiva ("Piccole dighe" USA)

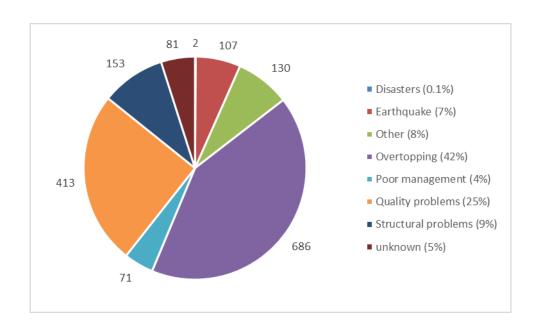


Figura 3.22 - Numero di incidenti per causa generica ("Piccole dighe" USA)

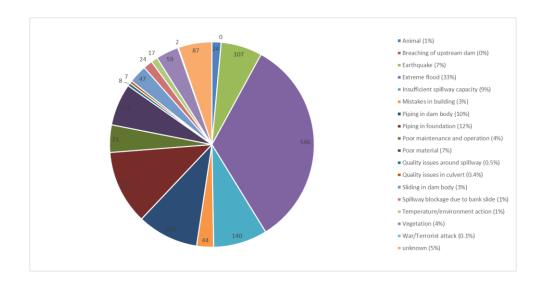


Figura 3.23 - Numero di incidenti per causa specifica ("Piccole dighe" USA)

3.5.2 Distribuzione incidenti "Grandi dighe" USA

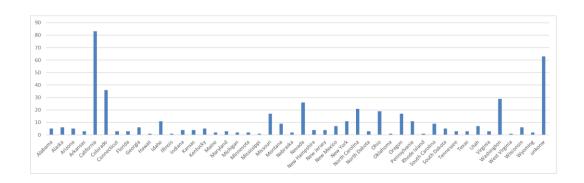


Figura 3.24 - Distribuzione incidenti per stato ("Grandi dighe" USA)

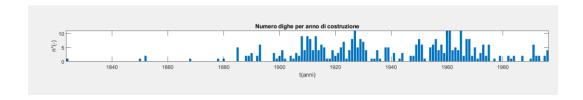


Figura 3.25 - Numero "Grandi dighe" USA soggete ad incidenti per anno di costruzione

Per 94 "Grandi dighe" non si conosce l'anno di costruzione/messa in esercizio. La diga più antica soggetta a incidente, appartenente alla famiglia delle "Grandi dighe", risale al 1824. Invece, la più giovane risulta realizzata nel 1996.

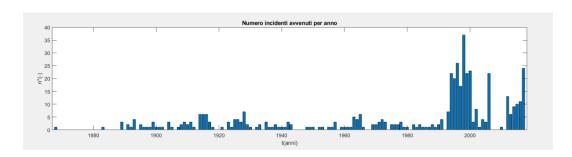


Figura 3.26 - Numero di incidenti avvenuti per anno, dal 1868 al 2017. ("Grandi dighe" USA)

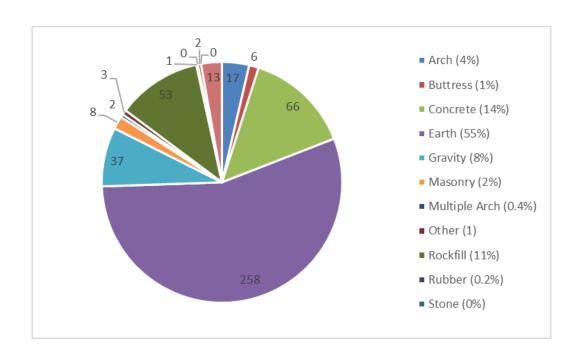


Figura 3.27 - Distribuzione incidenti per Tipologia costruttiva ("Grandi dighe" USA)

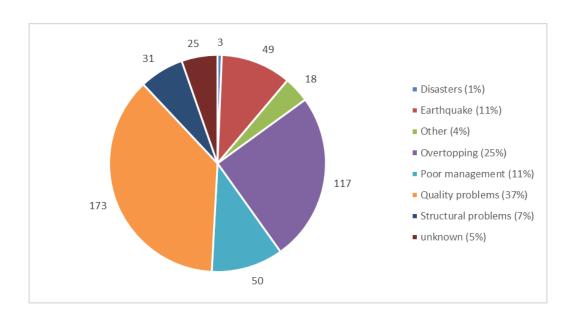


Figura 3.28 - Numero di incidenti per causa generica ("Grandi dighe" USA)

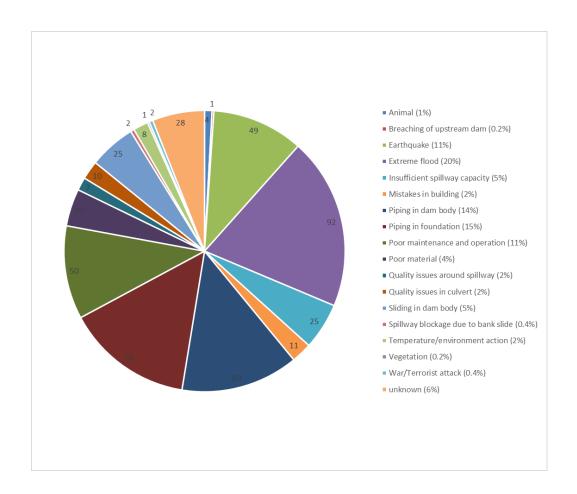


Figura 3.29 - Numero di incidenti per causa specifica ("Grandi dighe" USA)

4 ANALISI STATISTICA DELL'AFFIDABILITA' DELLE DIGHE AMERICANE

Il metodo adottato per calcolare e rappresentare l'andamento del tasso di guasto istantaneo e l'affidabilità delle dighe è quello del "Sistem reliability modeling", (capitolo 1). Tale teoria, basandosi sul concetto di affidabilità permette di ricavare dei modelli affidabilistici. L'applicazione alle sole dighe americane è dovuta al bias territoriale del database incidenti dighe, come ben illustrato nel capitolo 3. Il concetto di base è quello di utilizzare le dighe presenti nel database DPNP+FEMA, contenente 70561 dighe, come campione di prova e il database incidenti, riferito alle sole dighe statunitensi, contenente 3223 incidenti documentati, come risultato delle osservazioni effettuate sul campione di prova. Lo scopo finale è quello di ricavare l'andamento del tasso di guasto istanateneo in modo tale da individuare dei modelli probabilistici che descrivano l'andamento dell'affidabilità per le diverse fasi di vita del sistema diga. In questo capitolo, alla luce dell'importanza che il tasso di guasto riveste ai fini affidabilistici, verranno ricercati e interpretati gli andamenti del tasso di guasto istantaneo al variare del periodo di osservazione e della tipologia costruttiva delle dighe analizzate. Dopo aver tracciato l'andamento del tasso di guasto istantaneo per i vari casi osservati, si procederà con il tracciamento della probabilità cumulata di guasto e di affidabilità. L'analisi prevede di assumere che tutti gli incidenti hanno pari rilevanza, ma soprattutto che in seguito ad essi la diga è da considerarsi in stato di guasto e non ripristinabile. Inoltre, la prima fase dell'analisi viene eseguita senza tener conto della tipologia costruttiva e dell'altezza dello sbarramento. Solo in un secondo momento, le dighe verranno analizzate tenendo conto della tipologia costruttiva dello sbarramento e delle dimensioni. Per una valutazione più attendibile, si è deciso di calcolare e visualizzare l'andamento del tasso di guasto in base a diverse fasce di età: si partirà con l'analisi dei primi 10 anni di vita delle dighe realizzate prima del 2008, poi si eseguirà l'analisi dei primi 50 anni di vita di dighe realizzate prima del 1968 e infine, si procederà con le analisi dei primi 90 anni di vita di tutte le dighe realizzate prima del 1928.

Si è scelto di arrestare le analisi ai primi 90 anni di vita e di non spingersi oltre per mancanza di dati rilevanti all'interno del database. Normalmente, per stimare e raccogliere dati utili ai fini statistici si procede eseguendo dei test su più campioni. È ragionevole pensare che durante i test occorre riprodurre le stesse condizioni ambientali e di stress a cui solitamente sono soggetti gli elementi o i sistemi durante il loro esercizio. Nel nostro caso, purtroppo, visto la grandezza della finestra temporale di osservazione, bisogna fare uno sforzo mentale e riprodurre tali test in maniera virtuale, utilizzando i dati dei database sopra citati come campione e lettura dei risultati. Per il calcolo del tasso di guasto istantaneo, dell'affidabilità e della probabilità cumulata di guasto si è proceduto come segue:

- 1. Come primo passo si è creato un vettore chiamato "Numero_guasti_per_anno", in cui ogni elemento i-esimo rappresenta il numero di dighe guastatesi ogni anno, con i=1, 2, 3, ... Questo è stato possibile, utilizzando i dati del database incidenti e in particolare la colonna età al guasto. Gli incidenti verificatesi prima del primo anno di esercizio, con età al guasto pari a 0, sono stati ugualmente conteggiati come età al guasto pari a un anno.
- 2. Ipotizzando che all'anno 0, idealmente visto come l'anno in cui tutte le dighe vengono messe in esercizio, tutti gli sbarramenti risultino funzionanti, si è generato un vettore nominato "dighe_funzionanti" contenete il numero di dighe operative ogni anno a partire dalla teorica messa in esericizio o inizio dei test. All'anno 0, prima riga del vettore, il numero di dighe funzionanti è pari al numero di dighe per cui si conosce l'anno di costruzione, contenute nel database NPDP+FEMA, riferite alla finestra virtuale/temporale di prova per cui si sta analizzando il tasso di guasto. Tale scelta è dettata dal fatto che per poter analizzare il rateo di guasto e l'affidabilità per varie fasce di età e quindi per diversi periodi di osservazione, bisogna considerare che le dighe analizzate abbiano suparato tale intervallo temporale di vita. Ad esempio, per conoscere l'andamento del tasso di guasto per i primi dieci anni di vita, occorre che le dighe utilizzate come campione siano state costruite prima di tale intervallo temporale di osservazione altrimenti i risultati perderebbero di senso logico.

Per i successivi anni, elementi del vettore, si è proceduto calcolando per ogni i-esimo elemento la differenza tra il valore del numero di dighe all'anno 0 e il vettore "Cumulata_guasti" che non è altro che il vettore che cumula il numero di guasti avvenuti anno per anno.

3. Infine, dopo aver preparato i dati, come illustrato al punto 1 e 2, si procede al calcolo del tasso di guasto istantaneo, dell'affidabilità e della guastabilità tramite le seguenti formule:

Tasso di guasto

$$\lambda(t) = \frac{\textit{Numero dighe guaste nell'unità di tempo}}{\textit{Numero dighe funzionanti all'inizio dell'intervallo di tempo considetato}}$$

Affidabilità

$$R(t) = \frac{Numero\ dighe\ funzionanti\ nell'unità\ di\ tempo}{Numero\ dighe\ campione}$$

Guastabilità

$$F(t) = 1 - R(t)$$

Tutti i calcoli e l'elaborazione dei dati al punto 1 e 2 sono stati realizzati tramite l'ausilio di MATLAB, software di programmazione e calcolo numerico.

4.1 Andamento del tasso di guasto, dell'affidabilità e della probabilità di guasto delle dighe in generale

In questo paragrafo vengono prese in considerazione tutte le dighe contenute nei due database senza fare distinzione tra le varie tipologie costruttive. Di seguito, vengono elencati i principali dati utilizzati per il calcolo statistico del rateo di guasto istantaneo, dell'affidabilità e della probabilità di guasto per le varie analisi:

- Il numero totale di dighe all'interno del database NPDP+FEMA è pari a 70561;
- Il numero totale di dighe presenti all'interno del database incidenti dighe (solo dighe USA) è pari 3223;
- Il numero di dighe per cui si conosce l'anno di costruzione all'interno del database NPDN+FEMA è pari a 46555;
- Il numero di dighe per cui si conosce l'anno di costruzione all'interno del database incidenti (solo dighe USA) è pari a 1550;
- I dati dei due database sono aggiornati al 2018, per tale motivo le analisi possono considerarsi eseguite in tale anno.

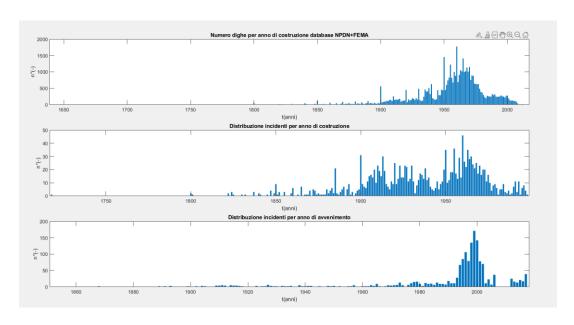


Figura 4.1 – Distribuzione campione

Analisi per i primi 10 anni di vita

Numero dighe realizzate prima del 2008 all'interno del database NPDP+FEMA, n = 46494. Numero dighe realizzate prima del 2008 che hanno subito un incidente prima dei 10 anni di vita, n = 176. Percentuale dighe soggette a incidente nei primi 10 anni di vita, n = 0.38%.

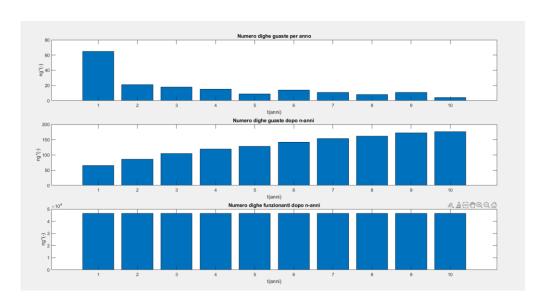


Figura 4.2 – Analisi per i primi 10 anni di vita

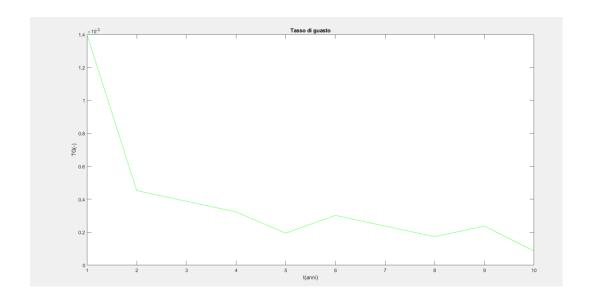


Figura 4.3 – Tasso di guasto, analisi per i primi 10 anni di vita

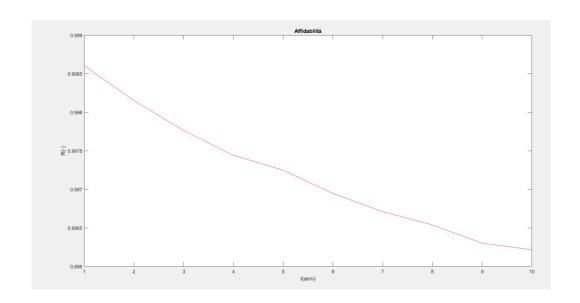


Figura 4.4 – Affidabilità, analisi per i primi 10 anni di vita

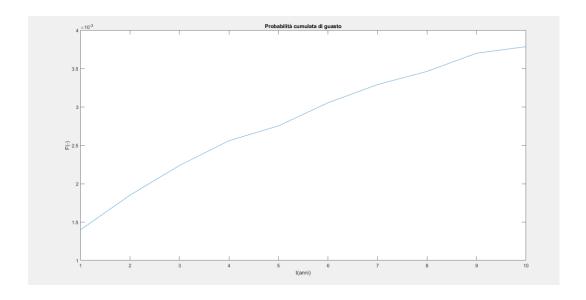


Figura 4.5 – Guastabilità, analisi per i primi 10 anni di vita

Analisi per i primi 50 anni di vita

Numero dighe realizzate prima del 1968 all'interno del database NPDP+FEMA, n = 31909. Numero dighe realizzate prima del 1968 che hanno subito un incidente prima dei 50 anni di vita, n = 610. Percentuale dighe soggette a incidente nei primi 50 anni di vita, n = 1.91%.

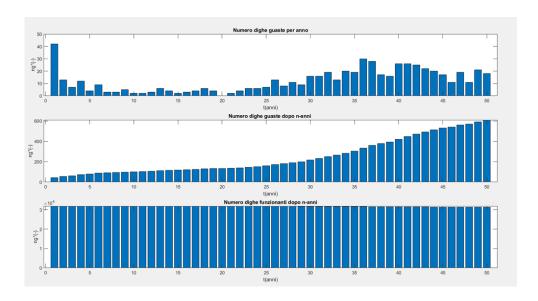


Figura 4.6 – Analisi per i primi 50 anni di vita

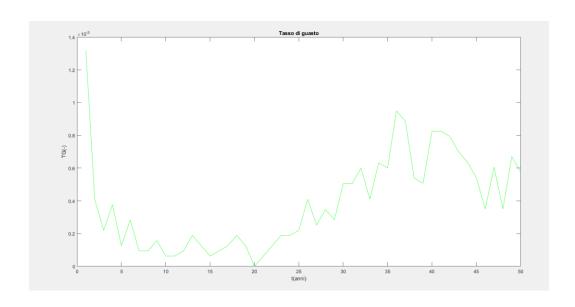


Figura 4.7- Tasso di guasto, analisi per i primi 50 anni di vita

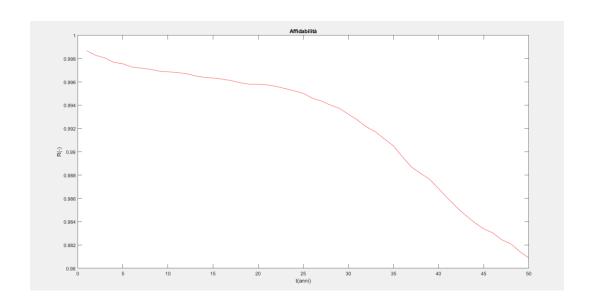


Figura 4.8 – Affidabilità, analisi per i primi 50 anni di vita

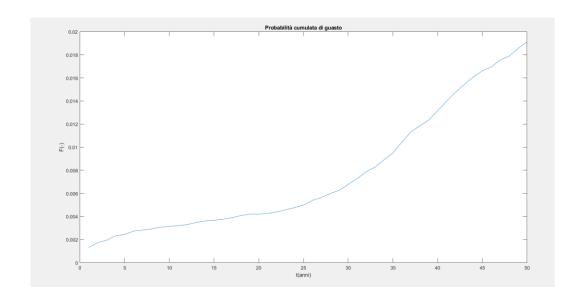


Figura 4.9 – Guastabilità, analisi per i primi 50 anni di vita

Analisi per i primi 90 anni di vita

Numero dighe realizzate prima del 1928 all'interno del database NPDP+FEMA, n=6638. Numero dighe realizzate prima del 1968 che hanno subito un incidente prima dei 90 anni di vita, n=377. Percentuale dighe soggette a incidente nei primi 90 anni di vita, n=5.68%.

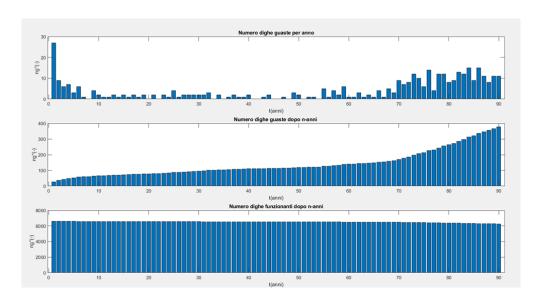


Figura 4.10 – Analisi per i primi 90 anni di vita

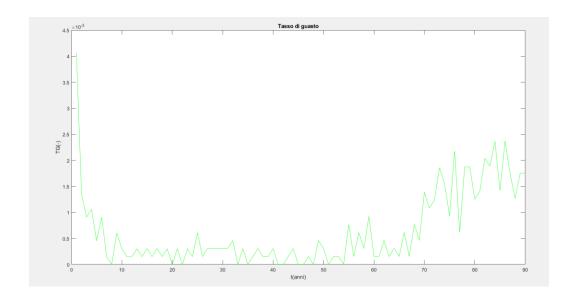


Figura 4.11 – Tasso di guasto, analisi per i primi 90 anni di vita

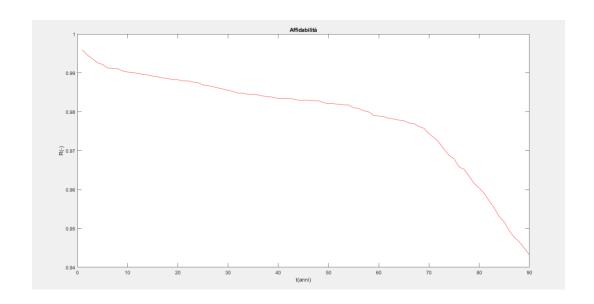


Figura 4.12 – Affidabilità, analisi per i primi 90 anni di vita

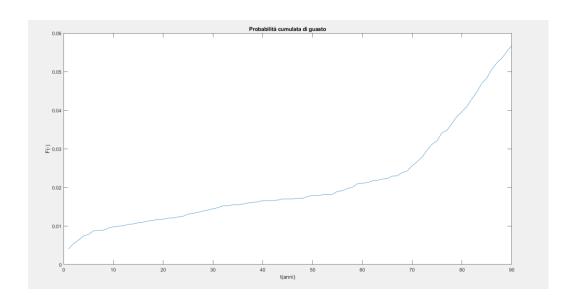


Figura 4.13 – Guastabilità, analisi per i primi 90 anni di vita

Analisi per i primi 10 anni di vita (Piccole dighe)

Numero piccole dighe realizzate prima del 2008 all'interno del database NPDP+FEMA, n=43093. Numero piccole dighe realizzate prima del 2008 che hanno subito un incidente prima dei 10 anni di vita, n=85. Percentuale piccole dighe soggette a incidente nei primi 10 anni di vita, n=0.20%.

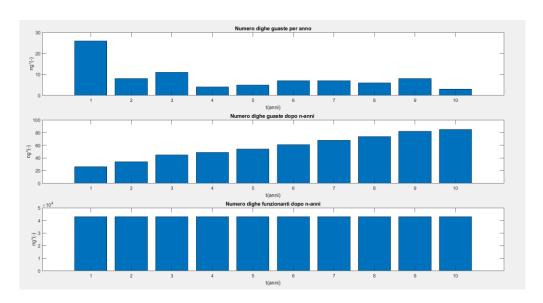


Figura 4.14 – (Piccole dighe), analisi per i primi 10 anni di vita

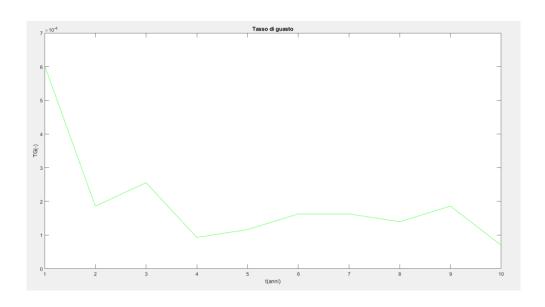


Figura 4.15 – Tasso di guasto (Piccole dighe), analisi per i primi 10 anni di vita

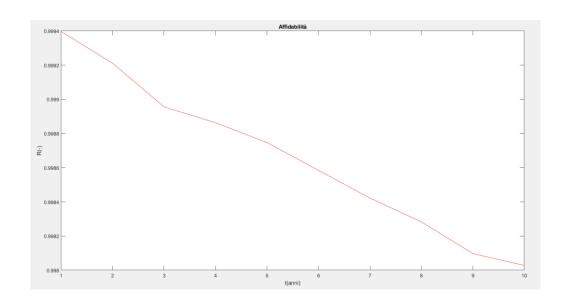


Figura 4.16 – Affidabilità (Piccole dighe), analisi per i primi 10 anni di vita

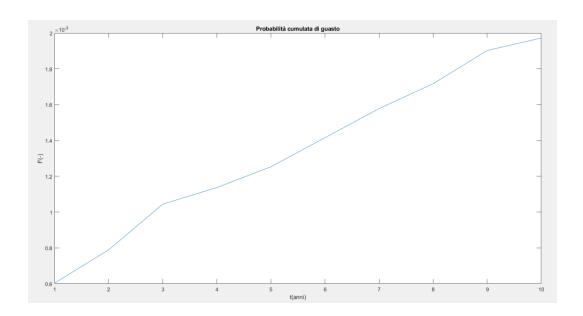


Figura 4.17 – Guastabilità (Piccole dighe), analisi per i primi 10 anni di vita

Analisi per i primi 50 anni di vita (Piccole dighe)

Numero piccole dighe realizzate prima del 1968 all'interno del database NPDP+FEMA, n=29775. Numero piccole dighe realizzate prima del 1968 che hanno subito un incidente prima dei 50 anni di vita, n=390. Percentuale piccole dighe soggette a incidente nei primi 50 anni di vita, n=1.31%.

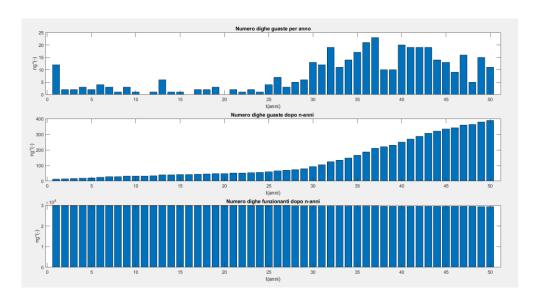


Figura 4.18 – (Piccole dighe), analisi per i primi 50 anni di vita

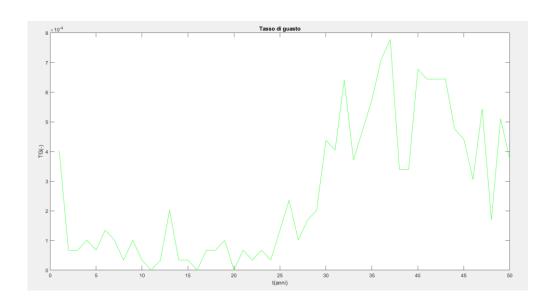


Figura 4.19 – Tasso di guasto (Piccole dighe), analisi per i primi 50 anni di vita

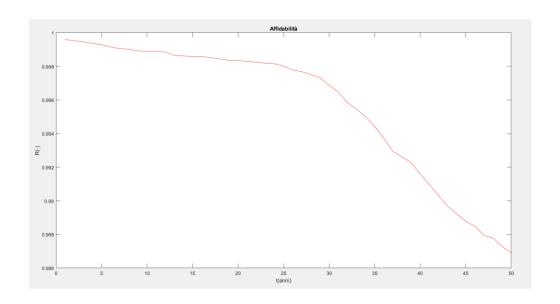


Figura 4.20 – Affidabilità (Piccole dighe), analisi per i primi 50 anni di vita

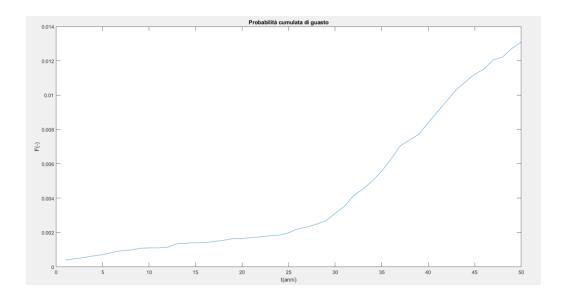


Figura 4.21 – Guastabilità (Piccole dighe), analisi per i primi 50 anni di vita

Analisi per i primi 90 anni di vita (Piccole dighe)

Numero piccole dighe realizzate prima del 1928 all'interno del database NPDP+FEMA, n=6084. Numero piccole dighe realizzate prima del 1928 che hanno subito un incidente prima dei 90 anni di vita, n=229. Percentuale piccole dighe soggette a incidente nei primi 90 anni di vita, n=3.76%.

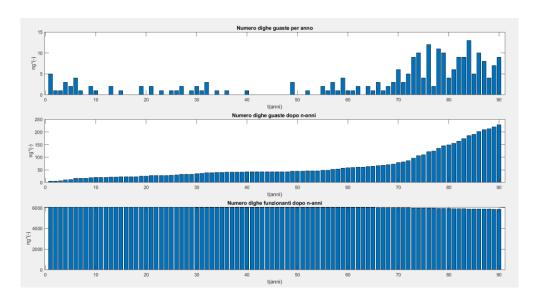


Figura 4.22 – (Piccole dighe), analisi per i primi 90 anni di vita

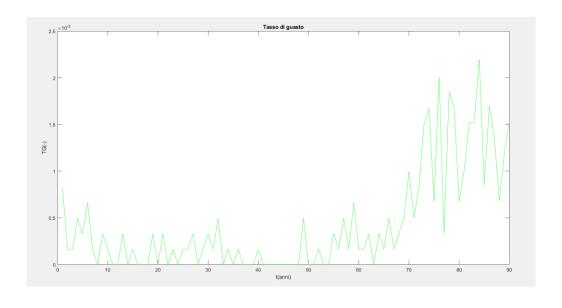


Figura 4.23 – Tasso di guasto (Piccole dighe), analisi per i primi 90 anni di vita

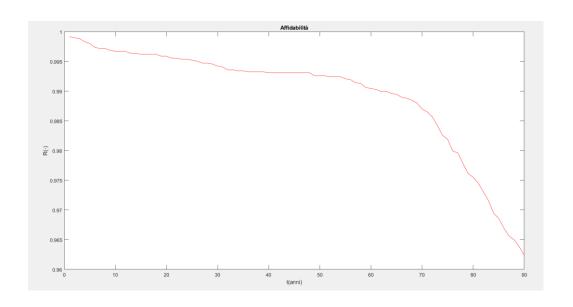


Figura 4.24 – Affidabilità (Piccole dighe), analisi per i primi 90 anni di vita

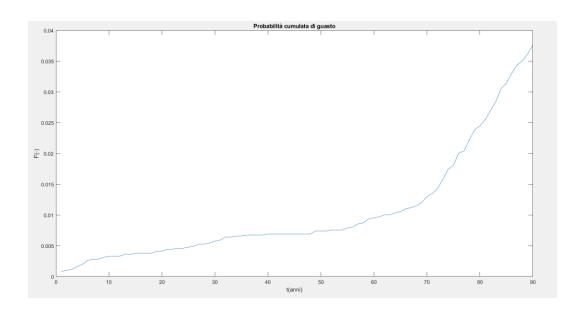


Figura 4.25 – Guastabilità (Piccole dighe), analisi per i primi 90 anni di vita

Analisi per i primi 10 anni di vita (Grandi dighe)

Numero grandi dighe realizzate prima del 2008 all'interno del database NPDP+FEMA, n = 3401. Numero grandi dighe realizzate prima del 2008 che hanno subito un incidente prima dei 10 anni di vita, n = 81. Percentuale grandi dighe soggette a incidente nei primi 10 anni di vita, n = 2.38%.

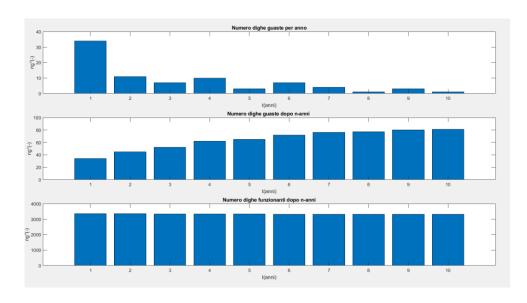


Figura 4.26 – (Grandi dighe), analisi per i primi 10 anni di vita

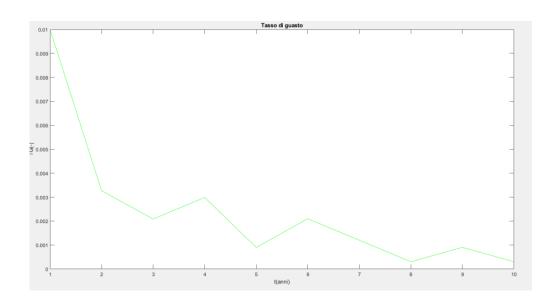


Figura 4.27 – Tasso di guasto (Grandi dighe), analisi per i primi 10 anni di vita

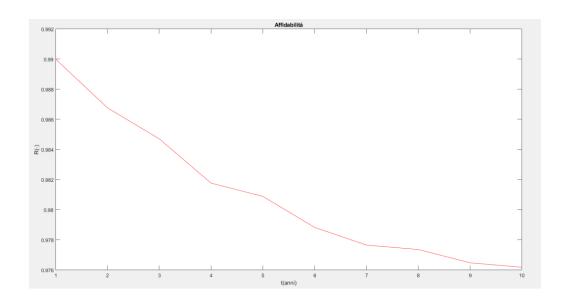


Figura 4.28 – Affidabilità (Grandi dighe), analisi per i primi 10 anni di vita

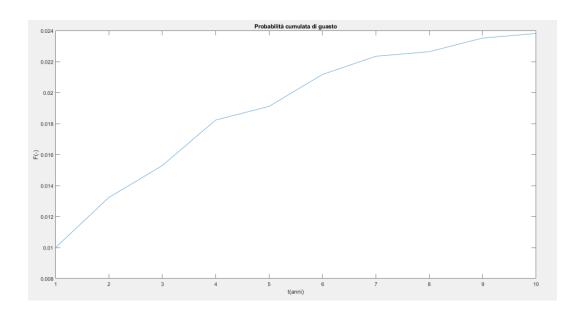


Figura 4.29 – Guastabilità (Grandi dighe), analisi per i primi 10 anni di vita

Analisi per i primi 50 anni di vita (Grandi dighe)

Numero grandi dighe realizzate prima del 1968 all'interno del database NPDP+FEMA, n = 2134. Numero grandi dighe realizzate prima del 1968 che hanno subito un incidente prima dei 50 anni di vita, n = 174. Percentuale grandi dighe soggette a incidente nei primi 50 anni di vita, n = 8.15%.

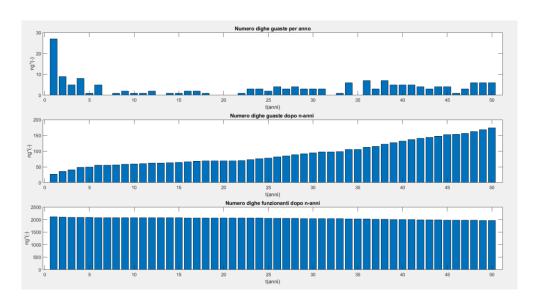


Figura 4.30 – (Grandi dighe), analisi per i primi 50 anni di vita

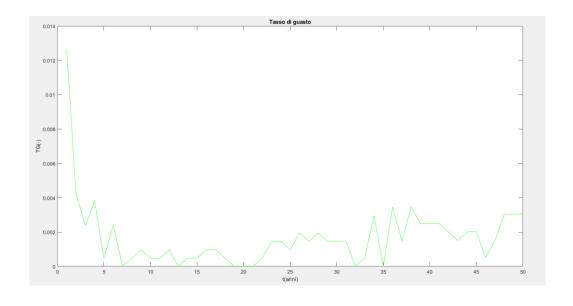


Figura 4.31 – Tasso di guasto (Grandi dighe), analisi per i primi 50 anni di vita

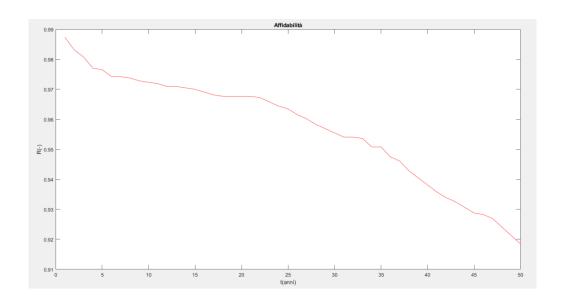


Figura 4.32 – Affidabilità (Grandi dighe), analisi per i primi 50 anni di vita

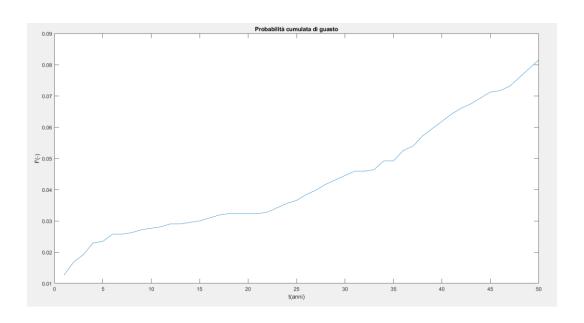


Figura 4.33 – Guastabilità (Grandi dighe), analisi per i primi 50 anni di vita

Analisi per i primi 90 anni di vita (Grandi dighe)

Numero grandi dighe realizzate prima del 1928 all'interno del database NPDP+FEMA, n = 554. Numero grandi dighe realizzate prima del 1928 che hanno subito un incidente prima dei 90 anni di vita, n = 128. Percentuale grandi dighe soggette a incidente nei primi 90 anni di vita, n = 23.10%.

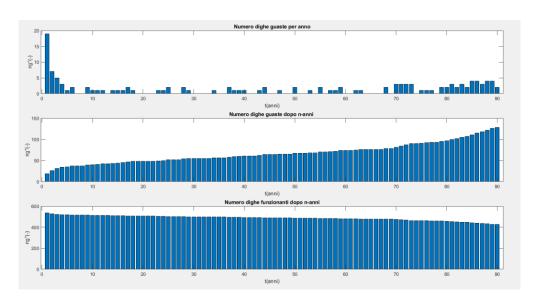


Figura 4.34 – (Grandi dighe), analisi per i primi 90 anni di vita

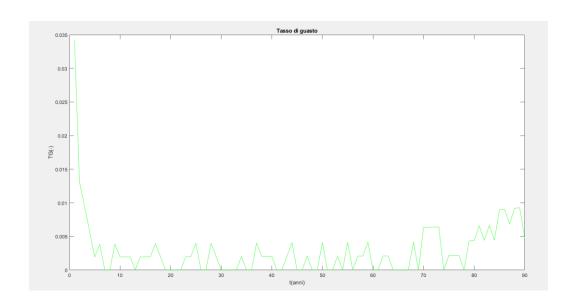


Figura 4.35 – Tasso di guasto (Grandi dighe), analisi per i primi 90 anni di vita

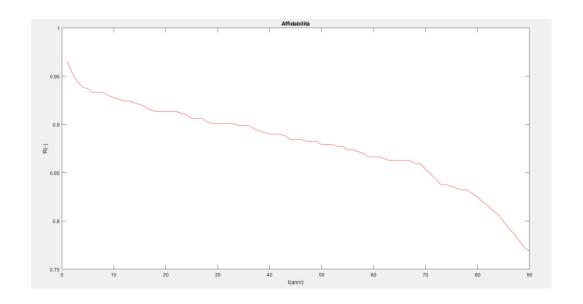


Figura 4.36 – Affidabilità (Grandi dighe), analisi per i primi 90 anni di vita

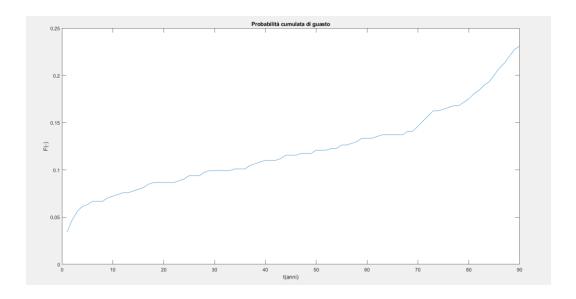


Figura 4.37– Guastabilità (Grandi dighe), analisi per i primi 90 anni di vita

4.2 Andamento del tasso di guasto, dell'affidabilità e della probabilità di guasto delle dighe in terra

Vengono qui considerate tutte le dighe in terra contenute nei due database. Di seguito sono elencati i principali dati utilizzati per il calcolo del tasso di guasto, dell'affidabilità e della probabilità di guasto:

- Il numero totale di dighe in terra all'interno del database NPDP+FEMA è pari a 56018;
- Il numero totale di dighe in terra presenti all'interno del database incidenti dighe (solo dighe USA) è pari 1628;
- Il numero di dighe in terra per cui si conosce l'anno di costruzione all'interno del database NPDN+FEMA è pari a 37672;
- Il numero di dighe in terra per cui si conosce l'anno di costruzione all'interno del database incidenti (solo dighe USA) è pari a 971;
- I dati dei due database sono aggiornati al 2018, per tale motivo le analisi possono considerarsi eseguite in tale anno.

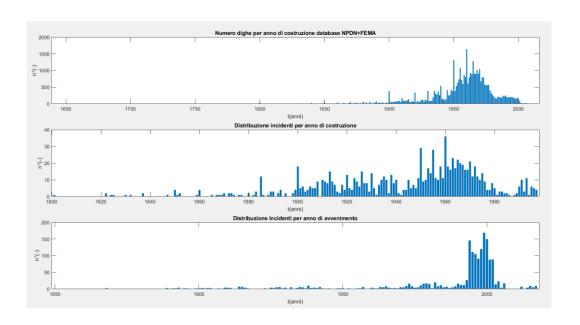


Figura 4.38 – Distribuzione campione (Dighe in terra)

Analisi per i primi 10 anni di vita (Dighe in terra)

Numero dighe in terra dighe realizzate prima del 2008 all'interno del database NPDP+FEMA, n = 37632. Numero dighe in terra dighe realizzate prima del 2008 che hanno subito un incidente prima dei 10 anni vita, n = 134. Percentuale dighe in terra soggette a incidente nei primi 10 anni di vita, n = 0.36%.

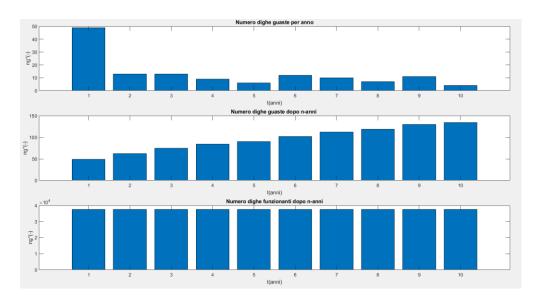


Figura 4.39 – (Dighe in terra), analisi per i primi 10 anni di vita

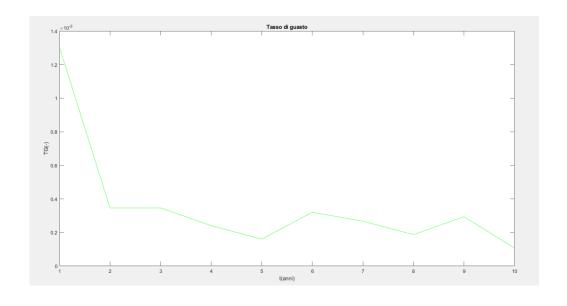


Figura 4.40 – Tasso di guasto (Dighe in terra), analisi per i primi 10 anni di vita

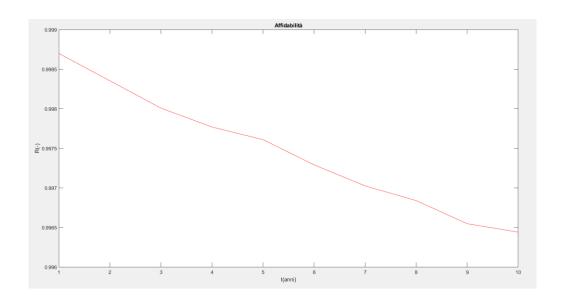


Figura 4.41 – Affidabilità (Dighe in terra), analisi per i primi 10 anni di vita

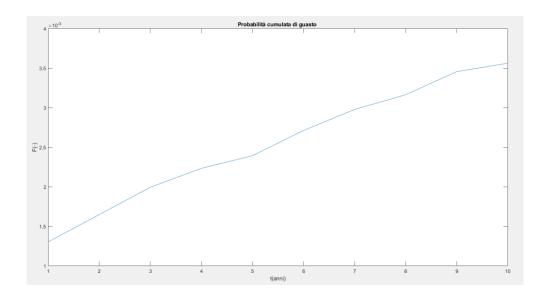


Figura 4.42 – Guastabilità (Dighe in terra), analisi per i primi 10 anni di vita

Analisi per i primi 50 anni di vita (Dighe in terra)

Numero dighe in terra realizzate prima del 1968 all'interno del database NPDP+FEMA, n=26105. Numero dighe in terra realizzate prima del 1968 che hanno subito un incidente prima dei 50 anni vita, n=445. Percentuale dighe in terra soggette a incidente nei primi 50 anni di vita, n=1.70%

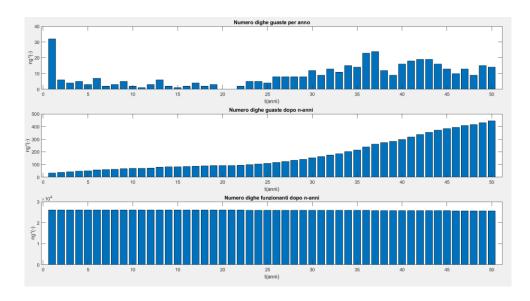


Figura 4.43 – (Dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di vita

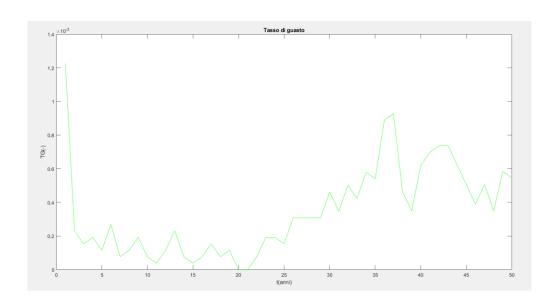


Figura 4.44 – Tasso di guasto (Dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di vita

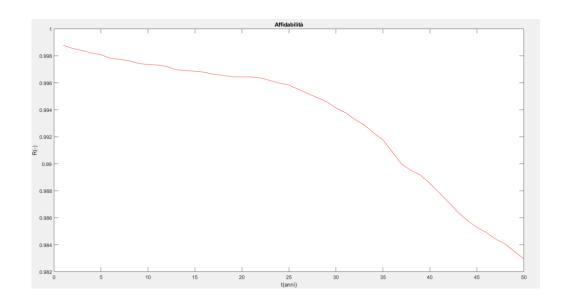


Figura 4.45 – Affidabilità (Dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di vita

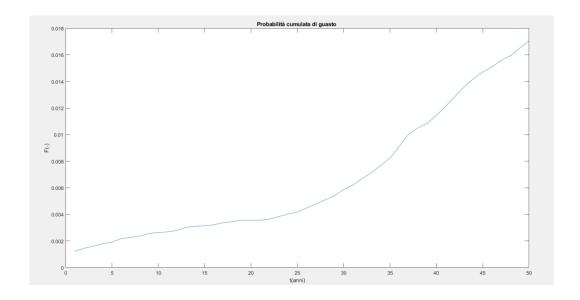


Figura 4.46 – Guastabilità (Dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di vita

Analisi per i primi 90 anni di vita (Dighe in terra)

Numero dighe in terra realizzate prima del 1928 all'interno del database NPDP+FEMA, n=4184. Numero dighe in terra realizzate prima del 1928 che hanno subito un incidente prima dei 90 anni vita, n=198. Percentuale dighe in terra soggette a incidente nei primi 90 anni di vita, n=4.73%

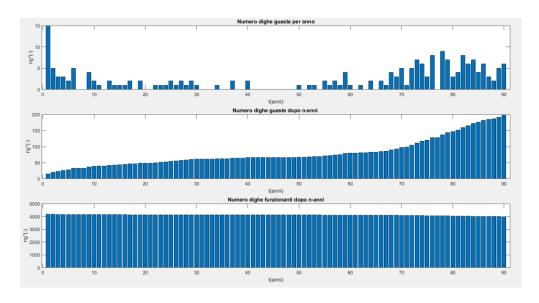


Figura 4.47 – (Dighe in terra), analisi per i primi 90 anni di vita

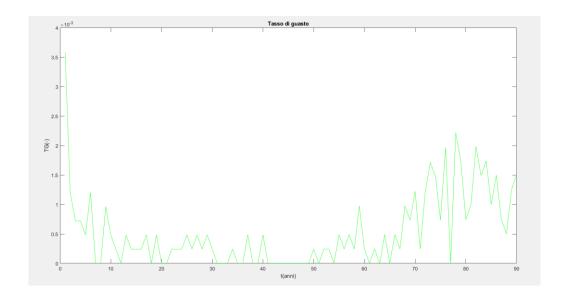


Figura 4.48 – Tasso di guasto (Dighe in terra), analisi per i primi 90 anni di vita

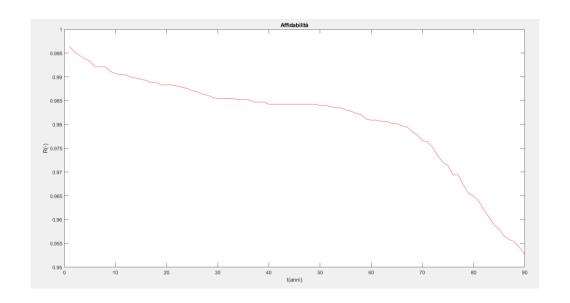


Figura 4.49 – Affidabilità (Dighe in terra), analisi per i primi 90 anni di vita

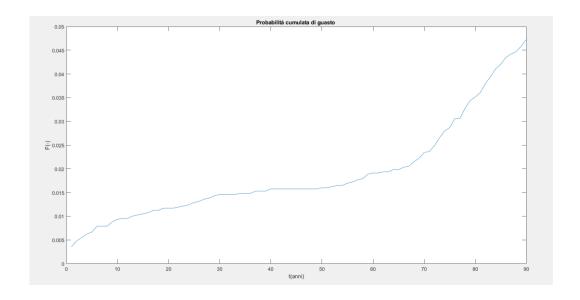


Figura 4.50 – Guastabilità (Dighe in terra), analisi per i primi 90 anni di vita

Analisi per i primi 10 anni di vita (Piccole dighe in terra)

Numero piccole dighe in terra dighe realizzate prima del 2008 all'interno del database NPDP+FEMA, n = 35451. Numero piccole dighe in terra dighe realizzate prima del 2008 che hanno subito un incidente prima dei 10 anni di vita, n = 68. Percentuale piccole dighe in terra soggette a incidente nei primi 10 anni di vita, n = 0.19%

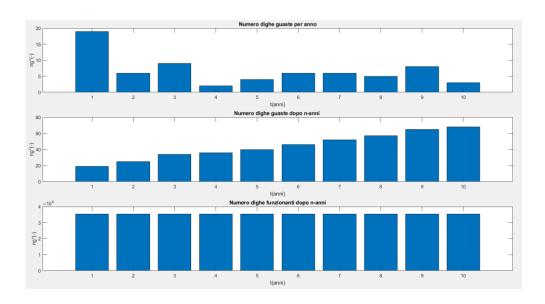


Figura 4.51- (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 10 anni di vita

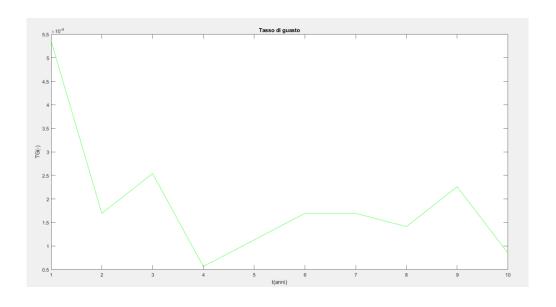


Figura 4.52 – Tasso di guasto (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 10 anni di vita

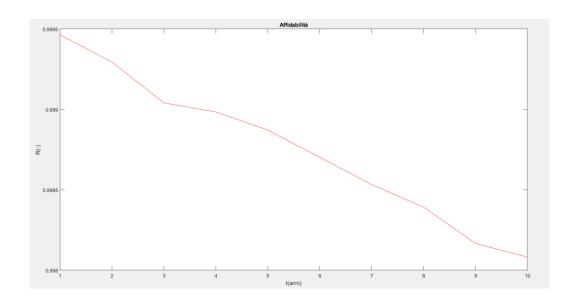


Figura 4.534.54 – Affidabilità (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 10 anni di vita

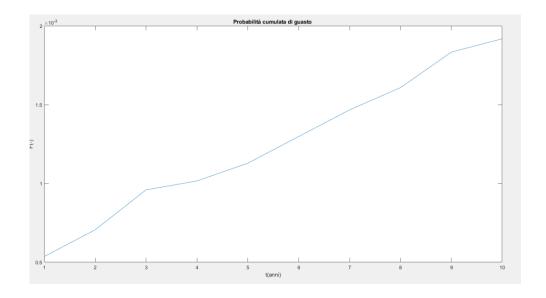


Figura 4.55 – Guastabilità (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 10 anni di vita

Analisi per i primi 50 anni di vita (Piccole dighe in terra)

Numero piccole dighe in terra realizzate prima del 1968 all'interno del database NPDP+FEMA, n = 24835. Numero piccole dighe in terra realizzate prima del 1968 che hanno subito un incidente prima dei 50 anni di vita, n = 306. Percentuale piccole dighe in terra soggette a incidente nei primi 50 anni di vita, n = 1.23%.

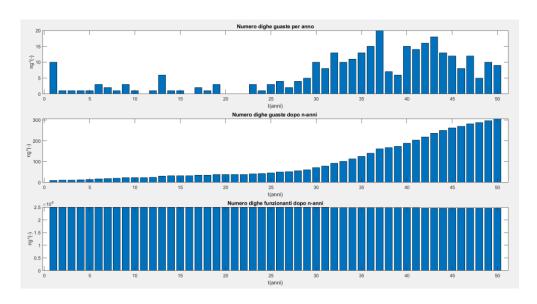


Figura 4.56 – (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di vita

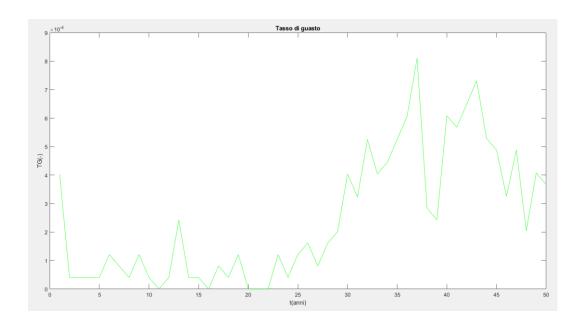


Figura 4.57 – Tasso di guasto (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di vita

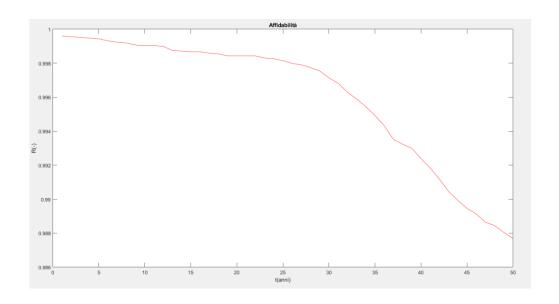


Figura 4.58 – Affidabilità (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di vita

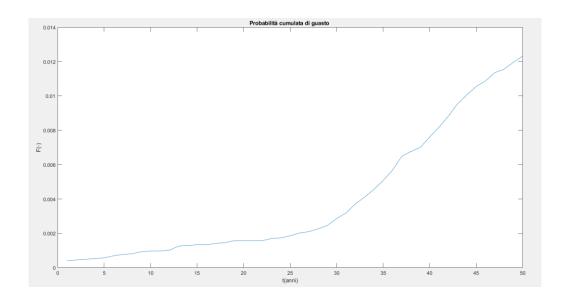


Figura 4.59 – Guastabilità (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di vita

Analisi per i primi 90 anni di vita (Piccole dighe in terra)

Numero piccole dighe in terra realizzate prima del 1928 all'interno del database NPDP+FEMA, n = 3955. Numero piccole dighe in terra realizzate prima del 1928 che hanno subito un incidente prima dei 90 anni di vita, n = 125. Percentuale piccole dighe in terra soggette a incidente nei primi 90 anni di vita n = 3.16%.

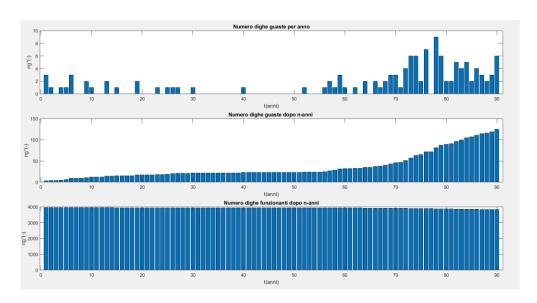


Figura 4.60 – (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 90 anni di vita

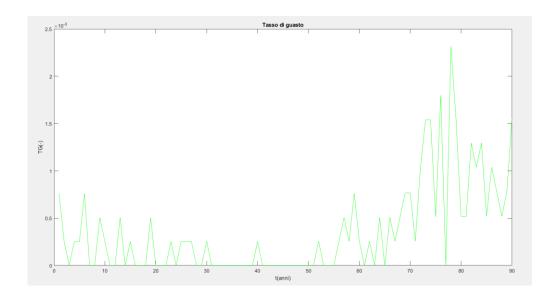


Figura 4.61 – Tasso di guasto (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 90 anni di vita

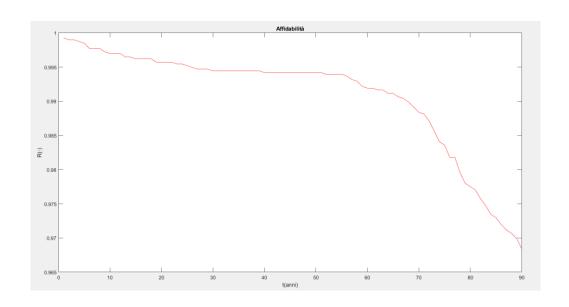


Figura 4.62– Affidabilità (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 90 anni di vita

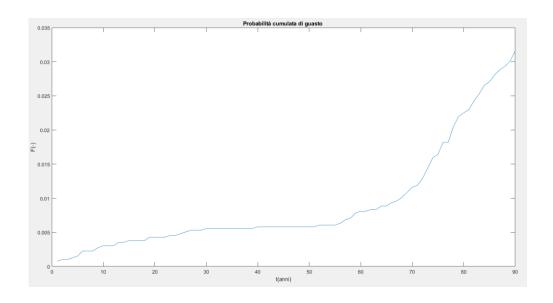


Figura 4.63 – Guastabilità (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 90 anni di vita

Analisi per i primi 10 anni di vita (Grandi dighe in terra)

Numero grandi dighe in terra dighe realizzate prima del 2008 all'interno del database NPDP+FEMA, n = 2181. Numero grandi dighe in dighe realizzate prima del 2008 che hanno subito un incidente prima dei 10 anni di vita, n = 59. Percentuale grandi dighe in terra soggette a incidente nei primi 10 anni di vita, n = 2.71%.

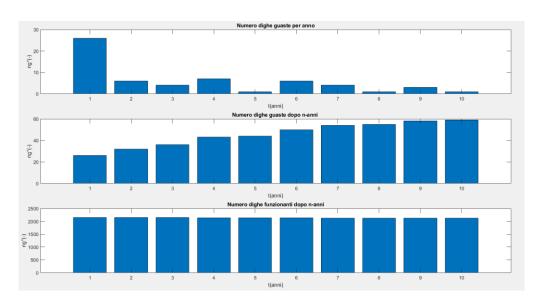


Figura 4.64 – (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 10 anni di vita

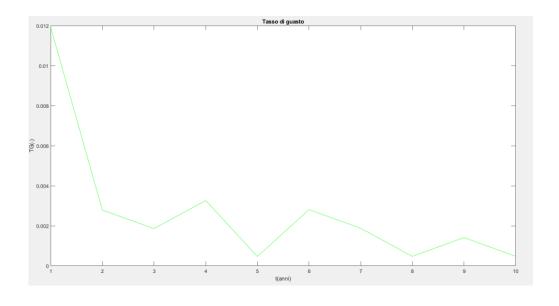


Figura 4.65 – Tasso di guasto (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 10 anni di vita

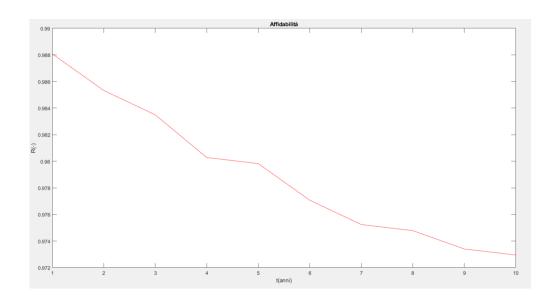


Figura 4.66 – Affidabilità (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 10 anni di vita

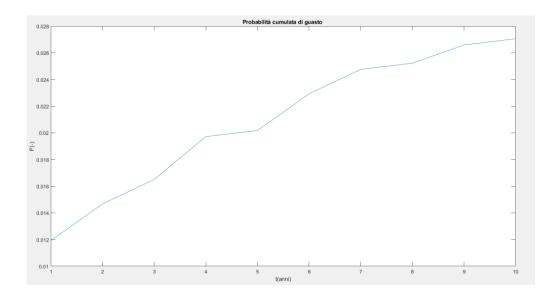


Figura 4.67 – Guastabilità (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 10 anni di vita

Analisi per i primi 50 anni di vita (Grandi dighe in terra)

Numero grandi dighe in terra realizzate prima del 1968 all'interno del database NPDP+FEMA, n=1270. Numero grandi dighe in terra realizzate prima del 1968 che hanno subito un incidente prima dei 50 anni di vita, n=114. Percentuale grandi dighe in terra soggette a incidente nei primi 50 anni di vita, n=8.98%.

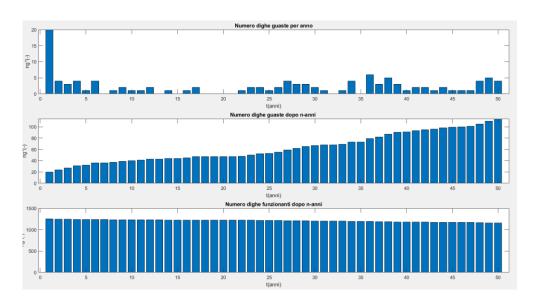


Figura 4.68- (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di vita

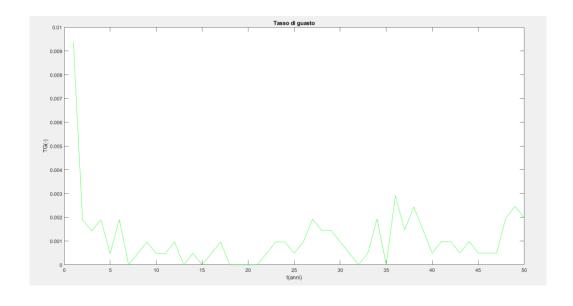


Figura 4.69 – Tasso di guasto (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di vita

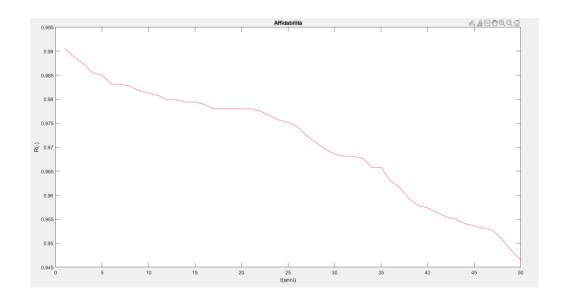


Figura 4.70 – Affidabilità (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di vita

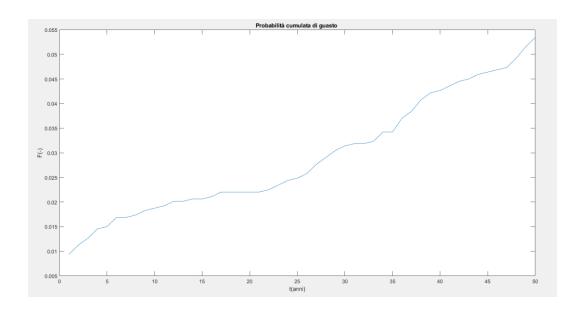


Figura 4.71 – Guastabilità (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di vita

Analisi per i primi 90 anni di vita (Grandi dighe in terra)

Numero grandi dighe in terra realizzate prima del 1928 all'interno del database NPDP+FEMA, n = 229. Numero grandi dighe in terra realizzate prima del 1928 che hanno subito un incidente prima dei 90 anni di vita, n = 67. Percentuale grandi dighe in terra soggette a incidente nei primi 90 anni di vita, n = 29.26%.

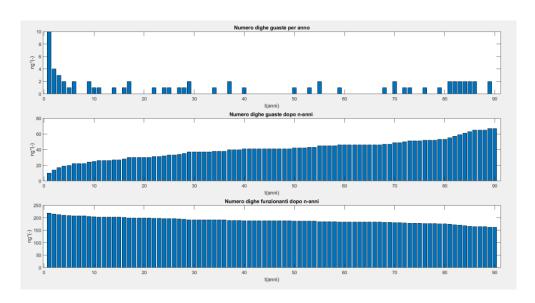


Figura 4.72 – (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 90 anni di vita

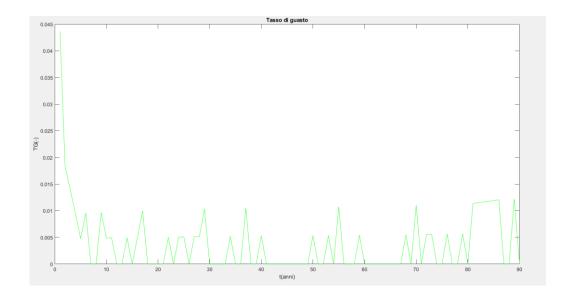


Figura 4.73 – Tasso di guasto (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 90 anni di vita

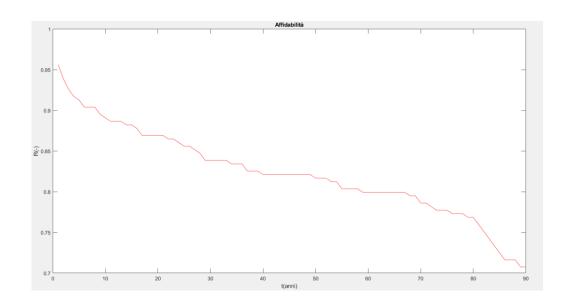


Figura 4.74 – Affidabilità (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 90 anni di vita

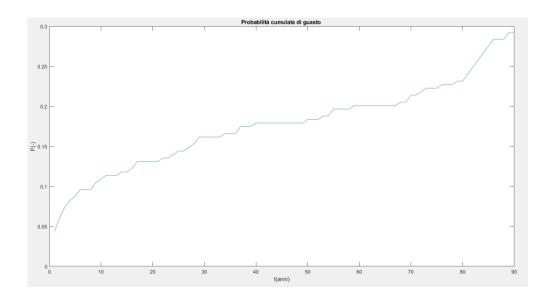


Figura 4.75 – Guastabilità (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 90 anni di vita

4.3 Andamento del tasso di guasto, dell'affidabilita e della probabilità di guasto delle dighe in muratura

In questo paragrafo vengono considerate tutte le dighe in muratura contenute nei due database. Di seguito vengono elencati i principali dati utilizzati per il calcolo del tasso di guasto, dell'affidabilità e della probabilità di guasto:

- Il numero totale di dighe in muratura all'interno del database NPDP+FEMA è pari a 6150;
- Il numero totale di dighe in muratura presenti all'interno del database incidenti dighe (solo dighe USA) è pari 575;
- Il numero di dighe in muratura per cui si conosce l'anno di costruzione all'interno del database NPDN+FEMA è pari a 4736;
- Il numero di dighe in muratura per cui si conosce l'anno di costruzione all'interno del database incidenti (solo dighe USA) è pari a 439;
- I dati dei due database sono aggiornati al 2018, per tale motivo le analisi possono considerarsi eseguite in tale anno.

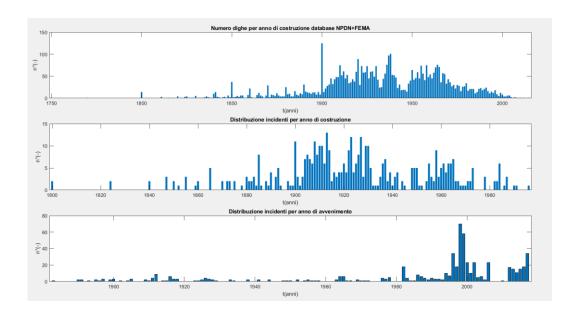


Figura 4.76 – Distribuzione campione (Dighe in muratura)

Analisi per i primi 10 anni di vita (Dighe in muratura)

Numero dighe in muratura realizzate prima del 2008 all'interno del database NPDP+FEMA, n = 4733. Numero dighe in muratura realizzate prima del 2008 che hanno subito un incidente prima dei 10 anni, n = 32. Percentuale dighe in muratura soggette a incidente nei primi 10 anni di vita, n = 0.68%.

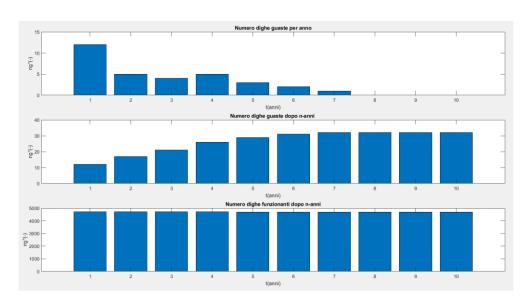


Figura 4.77 – (Dighe in muratura), analisi per i primi 10 anni di vita

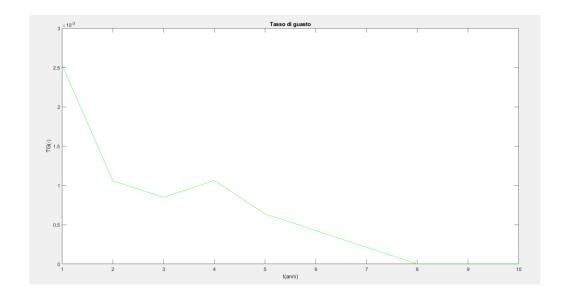


Figura 4.78 – Tasso di guasto (Dighe in muratura), analisi per i primi 10 anni di vita

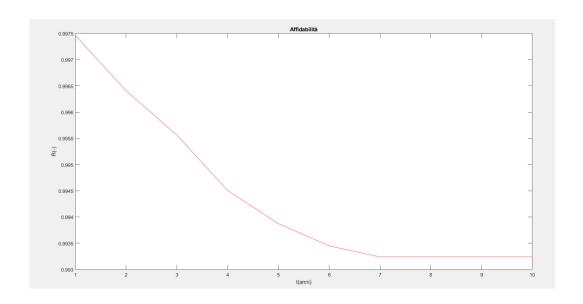


Figura 4.79 – Affidabilità (Dighe in muratura), analisi per i primi 10 anni di vita

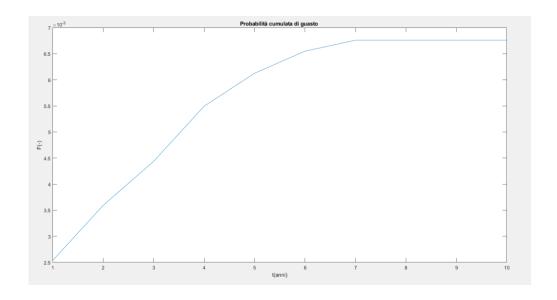


Figura 4.80 - Guastabilità (Dighe in muratura), analisi per i primi 10 anni di vita

Analisi per i primi 50 anni di vita (Dighe in muratura)

Numero dighe in muratura realizzate prima del 1968 all'interno del database NPDP+FEMA, n = 4036. Numero dighe in muratura realizzate prima del 1968 e hanno subito un incidente prima dei 50 anni di vita, n = 126. Percentuale dighe in muratura soggette a incidente nei primi 50 anni di vita, n = 3.12%.

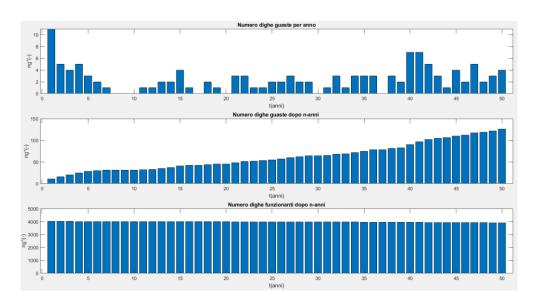


Figura 4.81 – (Dighe in muratura), analisi per i primi 50 anni di vita

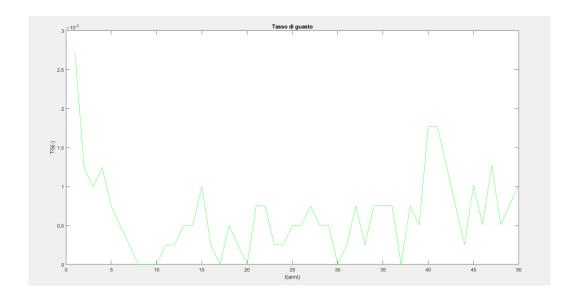


Figura 4.82 – Tasso di guasto (Dighe in muratura), analisi per i primi 50 anni di vita

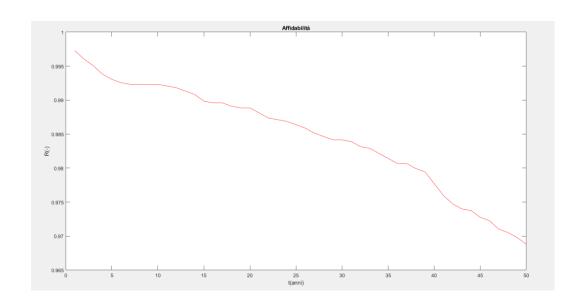


Figura 4.83 – Affidabilità (Dighe in muratura), analisi per i primi 50 anni di vita

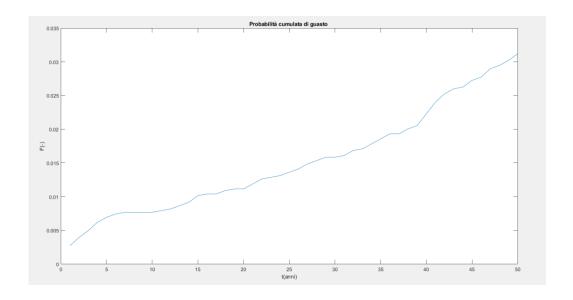


Figura 4.84 - Guastabilità (Dighe in muratura), analisi per i primi 50 anni di vita

Analisi per i primi 90 anni di vita (Dighe in muratura)

Numero dighe in muratura realizzate prima del 1928 all'interno del database NPDP+FEMA, n = 2029. Numero dighe in muratura realizzate prima del 1928 che hanno subito un incidente prima dei 90 anni di vita, n = 190. Percentuale dighe in muratura soggette a incidente nei primi 90 anni di vita, n = 9.36%.

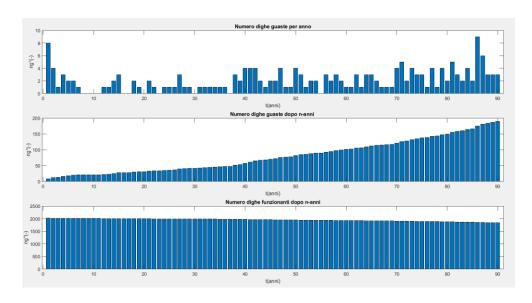


Figura 4.85 – (Dighe in muratura), analisi per i primi 90 anni di vita

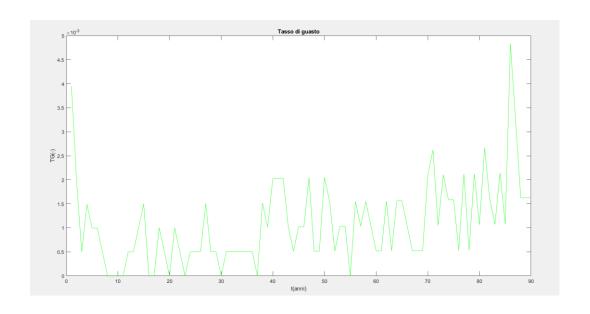


Figura 4.86 – Tasso di guasto (Dighe in muratura), analisi per i primi 90 anni di vita

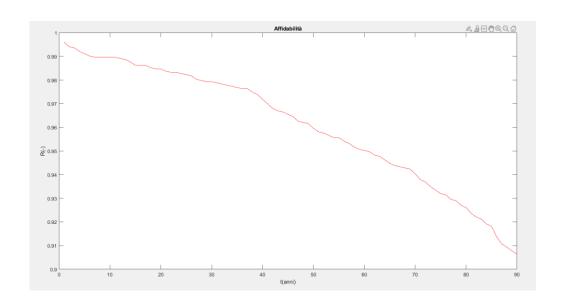


Figura 4.87 – Affidabilità (Dighe in muratura), analisi per i primi 90 anni di vita

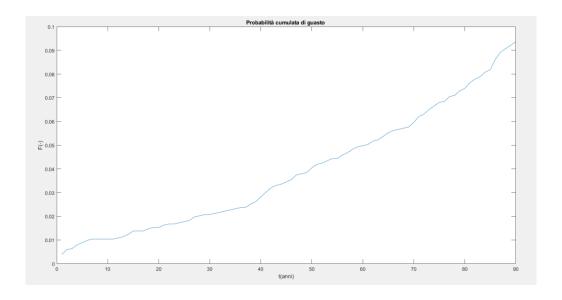


Figura 4.88 – Guastabilità (Dighe in muratura), analisi per i primi 90 anni di vita

Analisi per i primi 10 anni di vita (Piccole dighe in muratura)

Numero piccole dighe in muratura realizzate prima del 2008 all'interno del database NPDP+FEMA, n=4064. Numero piccole dighe in muratura realizzate prima del 2008 che hanno subito un incidente prima dei 10 anni, n=13. Percentuale piccole dighe in muratura soggette a incidente nei primi 10 anni di vita, n=0.32%.

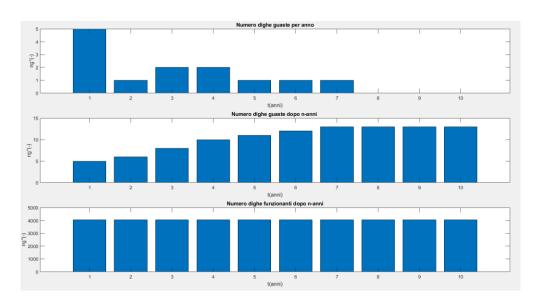


Figura 4.89 – (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 10 anni di vita

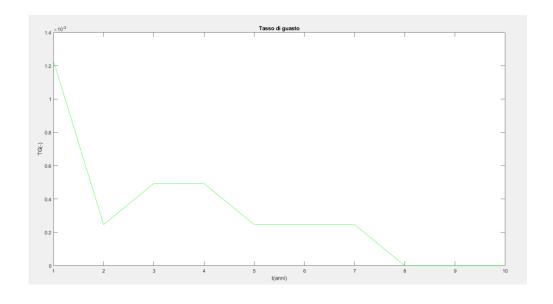


Figura 4.90 – Tasso di guasto (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 10 anni di vita

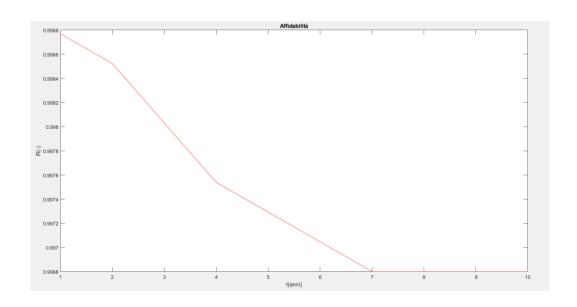


Figura 4.91 – Affidabilità (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 10 anni di vita

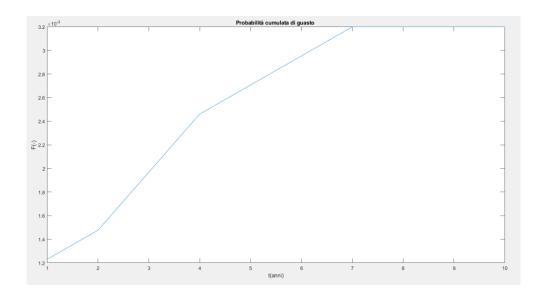


Figura 4.92 – Guastabilità (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 10 anni di vita

Analisi per i primi 50 anni di vita (Piccole dighe in muratura)

Numero piccole dighe in muratura realizzate prima del 1968 all'interno del database NPDP+FEMA, n = 3477. Numero piccole dighe in muratura realizzate prima del 1968 che hanno subito un incidente prima dei 50 anni di vita, n = 49. Percentuale piccole dighe in muratura soggette a incidente nei primi 50 anni di vita, n = 1.41%.

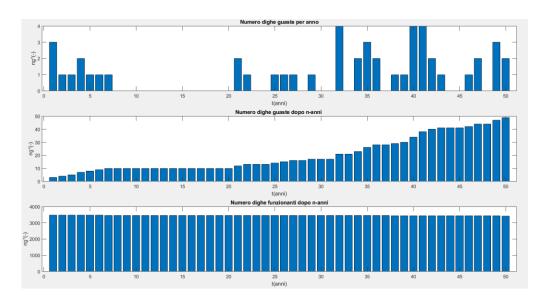


Figura 4.93 – (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 50 anni di vita

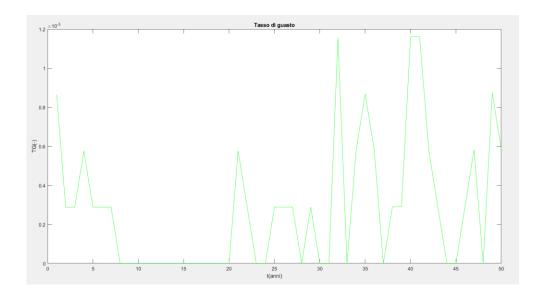


Figura 4.94 - Tasso di guasto (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 50 anni di vita

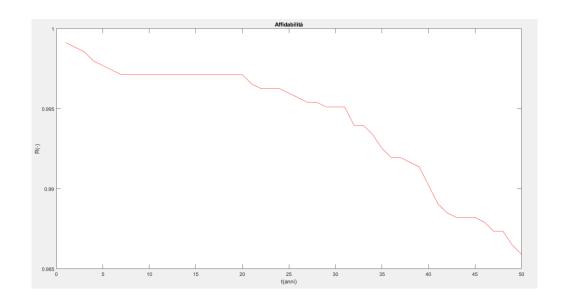


Figura 4.95 - Affidabilità (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 50 anni di vita

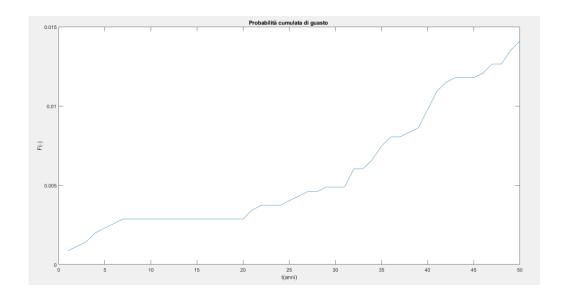


Figura 4.96 - Guastabilità (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 50 anni di vita

Analisi per i primi 90 anni di vita (Piccole dighe in muratura)

Numero piccole dighe in muratura realizzate prima del 1928 all'interno del database NPDP+FEMA, n = 3477. Numero piccole dighe in muratura realizzate prima del 1928 che hanno subito un incidente prima dei 90 anni, n = 49. Percentuale piccole dighe in muratura soggette a incidente nei primi 90 anni di vita, n = 1.41%.

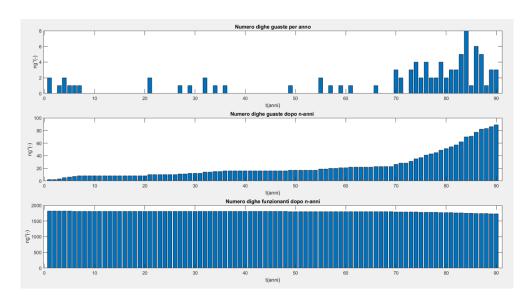


Figura 4.97 – (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 90 anni di vita

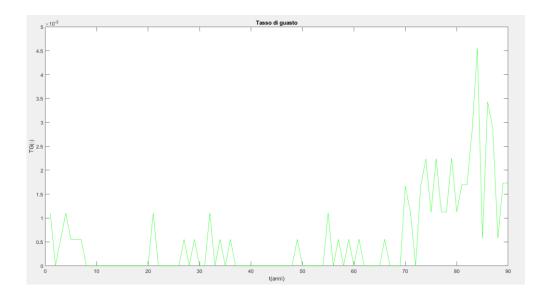


Figura 4.98 – Tasso di guasto (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 90 anni di vita

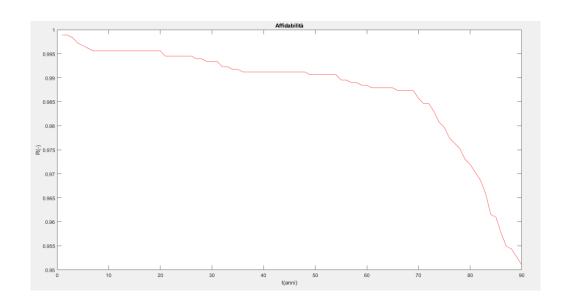


Figura 4.99 – Affidabilità (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 90 anni di vita

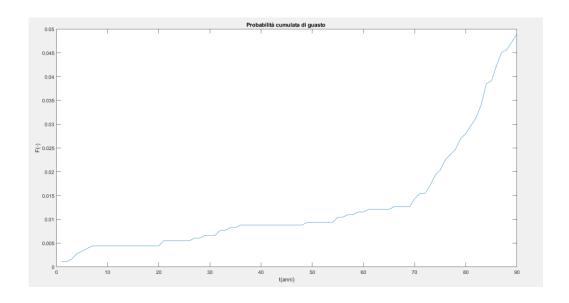


Figura 4.100 – Guastabilità (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 90 anni di vita

Analisi per i primi 10 anni di vita (Grandi dighe in muratura)

Numero grandi dighe in muratura realizzate prima del 2008 all'interno del database NPDP+FEMA, n = 972. Numero grandi dighe in muratura realizzate prima del 2008 che hanno subito un incidente prima dei 10 anni di vita, n = 18. Percentuale grandi dighe in muratura soggette a incidente nei primi 10 anni di vita n = 1.85%.

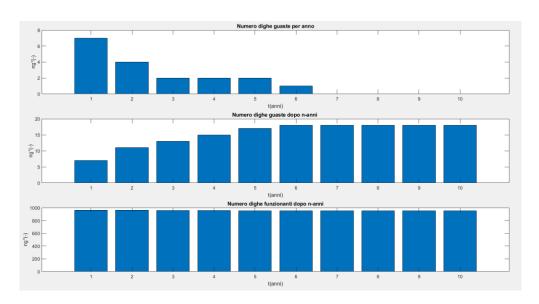


Figura 4.101 – (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 10 anni di vita

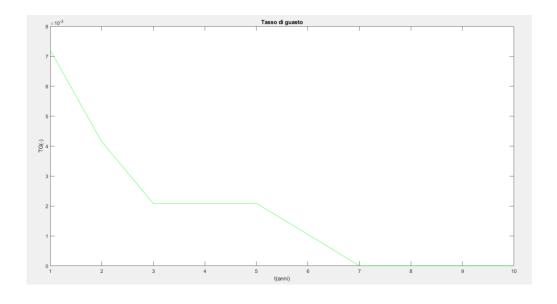


Figura 4.102 – Tasso di guasto (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 10 anni di vita

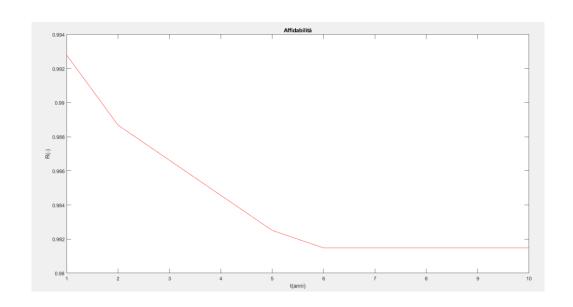


Figura 4.103 – Affidabilità (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 10 anni di vita

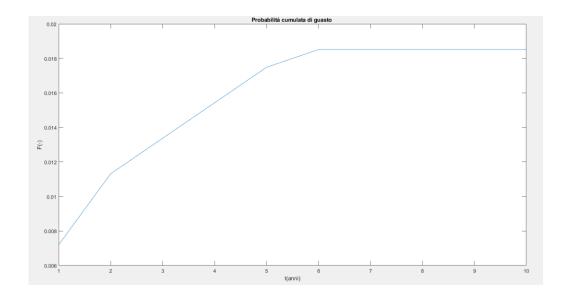


Figura 4.104 – Guastabilità (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 10 anni di vita

Analisi per i primi 50 anni di vita (Grandi dighe in muratura)

Numero grandi dighe in muratura realizzate prima del 1968 all'interno del database NPDP+FEMA, n = 784. Numero grandi dighe in muratura realizzate prima del 1968 che hanno subito un incidente prima dei 50 anni, n = 56. Percentuale grandi dighe in muratura soggette a incidente nei primi 50 anni di vita, n = 7.14%.

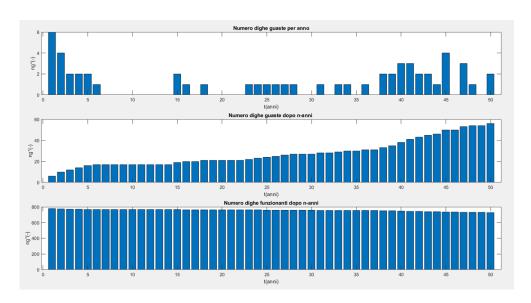


Figura 4.105 – (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 50 anni di vita

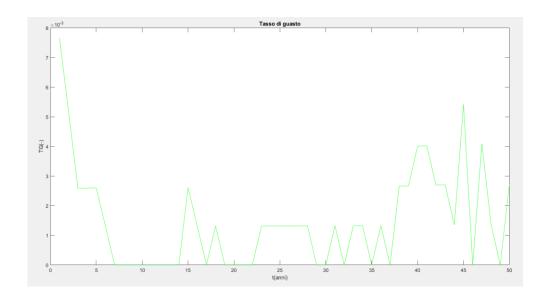


Figura 4.106 - Tasso di guasto (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 50 anni di vita

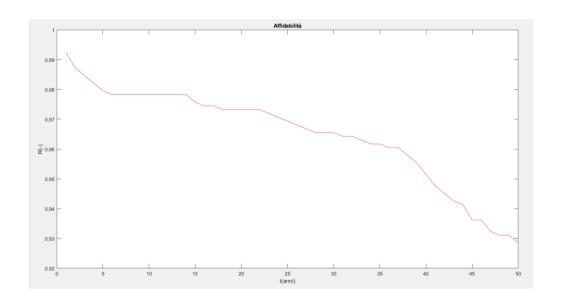


Figura 4.107 - Affidabilità (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 50 anni di vita

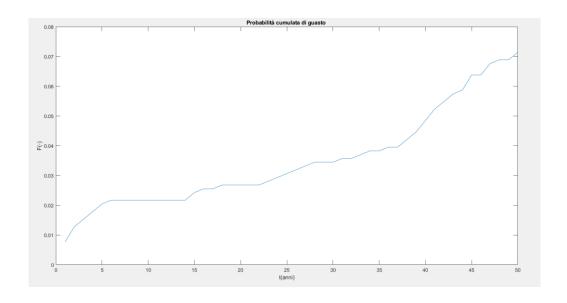


Figura 4.108 - Guastabilità (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 50 anni di vita

Analisi per i primi 90 anni di vita (Grandi dighe in muratura)

Numero grandi dighe in muratura realizzate prima del 1928 all'interno del database NPDP+FEMA, n = 287. Numero grandi dighe in muratura realizzate prima del 1928 che hanno subito un incidente prima dei 90 anni di vita, n = 68. Percentuale grandi dighe in muratura soggette a incidente nei primi 90 anni di vita, n = 23.69%.

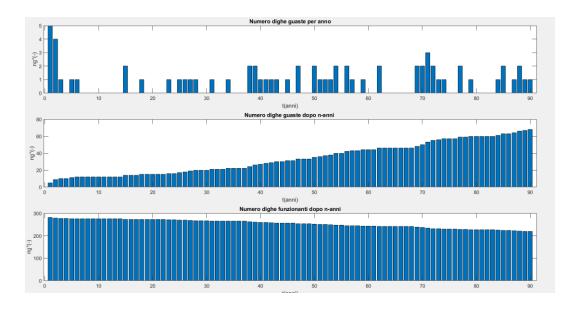


Figura 4.109 – (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 90 anni di vita

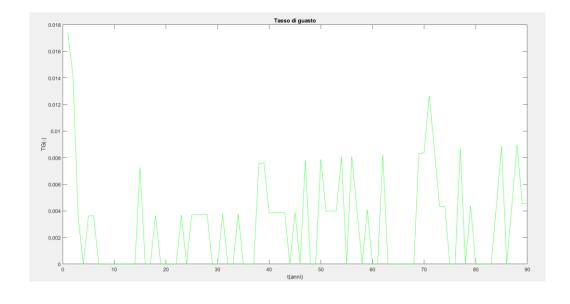


Figura 4.110 – Tasso di guasto (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 90 anni di vita

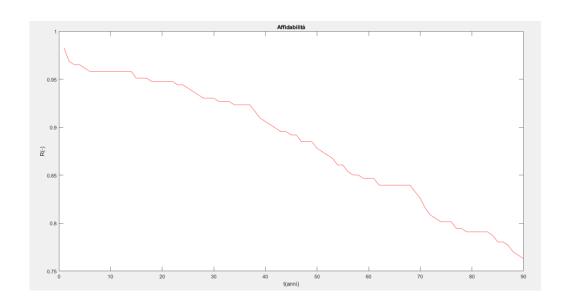


Figura 4.111 – Affidabilità (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 90 anni di vita

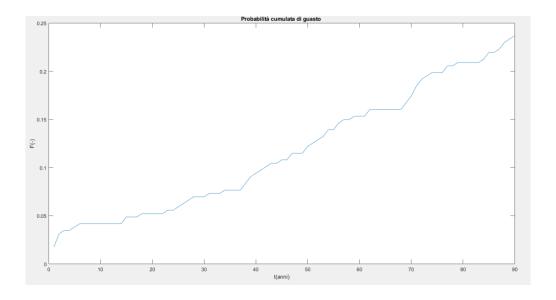


Figura 4.112 – Guastabilità (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 90 anni di vita

5 APPLICAZIONE DEL MODELLO ESPONENZIALE ALLE GRANDI DIGHE

5.1 Stima del parametro di affidabilità MTTF e applicazione del modello esponenziale alle grandi dighe

Come descritto nel capitolo 1, il modello probalistico esponenziale si adatta alla stima dell'affidabilità quando l'andamento del tasso di guasto può definirsi pressoché costante. Per tale motivo, in funzione dei dati analizzati, risulta evidente che il modello esponenziale è adeguato a rappresentare l'affidabilità delle grandi dighe durante il loro invecchiamento. L'andamento del rateo di guasto istantaneo mette in rilievo che le grandi dighe sono principalmente soggette a guasti casuali, dovuti a fattori incontrollabili che portano al superamento delle condizioni di stress d'esercizio. Dai risultati ottenuti nei precedenti paragrafi, partendo dai valori ricavati dalle analisi eseguite per le grandi dighe realizzate prima del 1968 e analizzate per i primi 50 anni di vita, si è proceduto all'eliminazione dei dati riferiti ai primi quattro anni di vita, dove il tasso di guasto istantaneo è riferito ai guasti infantili, e successivamente alla stima del mean time to failure (MTTF). La scelta di utilizzare tale analisi è dettata dalla notevole dimensione del campione; invece, la stima del tasso di guasto costante su un campione poco consistente porterrebbe a ricavare un modello poco affidabile. L'analisi eseguita per i primi 90 anni di vita viene utilizzata per confermare l'assunzione dell'andamento del rateo di guasto costante e a giusticare l'utilizzo del modello esponenziale.

Il valore del mean time to failure è stato ricavato come :

$$MTTF = \frac{T}{r} = \frac{\sum_{i=1}^{r} t_i + (N_0 - r) \cdot t_p}{r} = 784 \text{ anni/guasto}$$

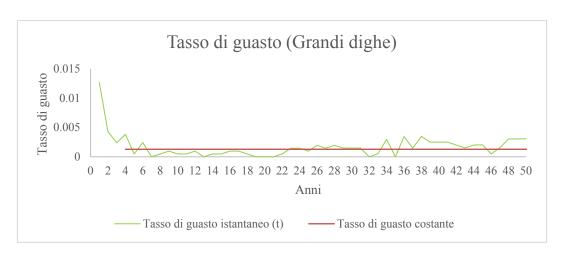
Dove:

r = 133 (componenti che hanno manifestato un guasto nel periodo di prova)

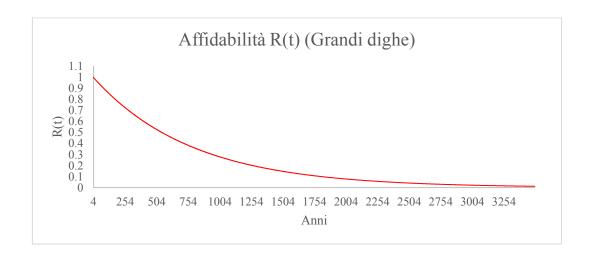
t_p = 50 anni (tempo di prova)

 $N_0 = 2134$ (dighe testate)

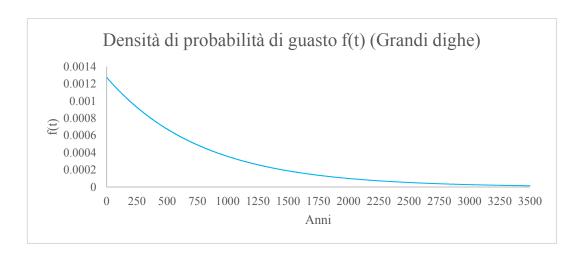
$$\sum_{i=1}^{r} t_i = 4219 \ anni$$



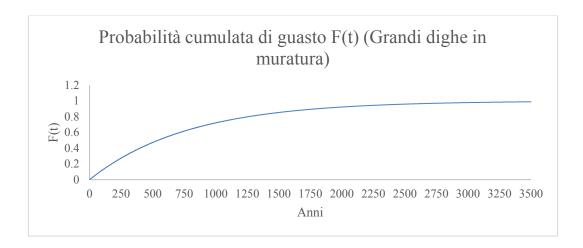
$$\lambda = \frac{1}{MTTF} = 0.001276 \ guasti/anno$$



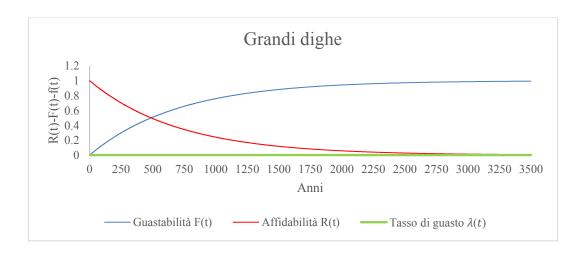
$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0.001276 \cdot t}$$



$$f(t) = R(t) \cdot \lambda$$



$$F(t) = 1 - R(t)$$



5.2 Stima del parametro di affidabilità MTTF e applicazione del modello esponenziale alle grandi dighe in muratura

Per una maggiore precisione dei valori di affidabilità riferiti alle dighe in muratura, si è deciso di calibrare il modello in funzione della tipologia costruttiva. Si procede ricalcolando il valore del MTTF sulla base dell'analisi eseguita per le grandi dighe in muratura realizzate prima del 1968 e analizzate per i primi 50 anni di vita. Anche in questo caso, l'analisi eseguita per i primi 90 anni di vita viene utilizzata per dimostrare che il tasso di guasto rimane costante nel tempo.

$$MTTF = \frac{T}{r} = \frac{\sum_{i=1}^{r} t_i + (N_0 - r) \cdot t_p}{r} = 874 \text{ anni/guasto}$$

Dove:

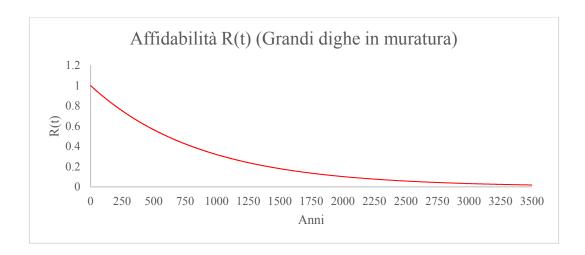
r = 44 (componenti che hanno manifestato un guasto nel periodo di prova)

 $t_p = 50$ anni (tempo di prova)

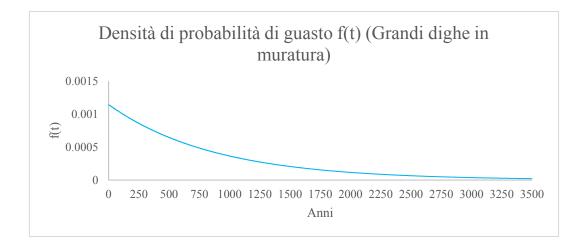
 $N_0 = 784$ (dighe testate)

$$\sum_{i=1}^{r} t_i = 1455 \ anni$$

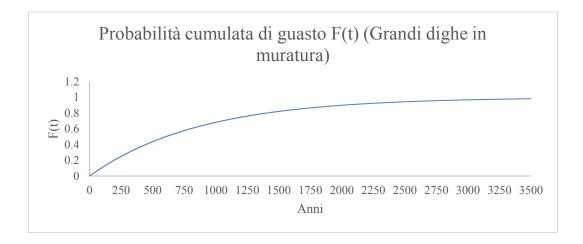
$$\lambda = \frac{1}{MTTF} = 0.001144 \ guasti/anno$$



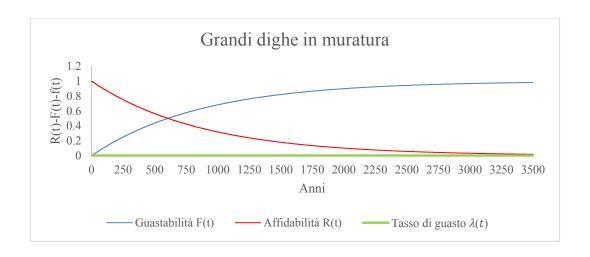
$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0.001144 \cdot t}$$



$$f(t) = R(t) \cdot \lambda$$



$$F(t) = 1 - R(t)$$



5.3 Stima del parametro di affidabilità MTTF e applicazione del modello esponenziale alle grandi dighe in terra

Come per le grandi dighe in muratura, anche per le grandi dighe in terra, è stato calibrato il modello in funzione della tipologia costruttiva. Si procede ricalcolando il valore del MTTF sulla base dell'analisi eseguita per le grandi dighe in terra realizzate prima del 1968 e analizzate per i primi 50 anni di vita. Anche in questo caso, l'analisi eseguita per i primi 90 anni di vita viene utilizzata per dimostrare che il tasso di guasto rimane costante nel tempo.

$$MTTF = \frac{T}{r} = \frac{\sum_{i=1}^{r} t_i + (N_0 - r) \cdot t_p}{r} = 710 \text{ anni/guasto}$$

Dove:

r = 87 (componenti che hanno manifestato un guasto nel periodo di prova)

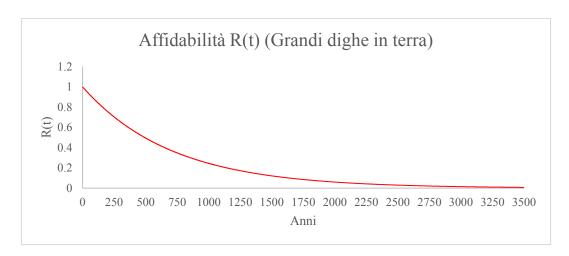
 $t_p = 50$ anni (tempo di prova)

 $N_0 = 1270$ (dighe testate)

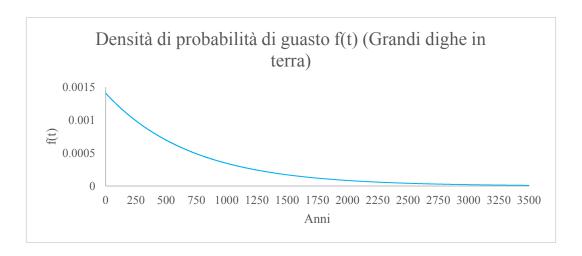
$$\sum_{i=1}^{r} t_i = 2658 \, anni$$



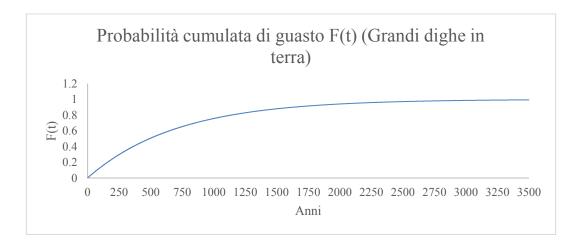
$$\lambda = \frac{1}{MTTF} = 0.001408 \ guasti/anno$$



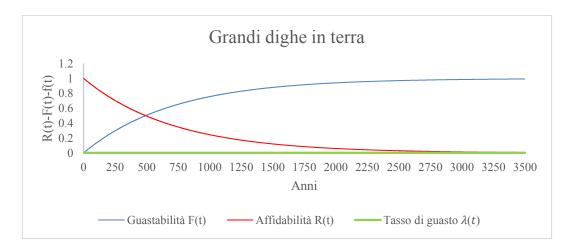
$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0.001408 \cdot t}$$



$$f(t) = R(t) \cdot \lambda$$



$$F(t) = 1 - R(t)$$



CONCLUSIONI

Dalle analisi effettuate in maniera generica, senza tener conto della tipologia costruttiva e delle dimensioni delle dighe analizzate, si deduce quanto segue: l'andamento del rateo di guasto, per l'analisi eseguita al fine di valutare l'andamento nei primi 50 anni di vita, mostra un'iniziale decrescita all'interno dei primi 4 anni di vita, confermata anche dall'andamento del tasso di guasto calcolato nell'analisi eseguita per la valutazione nei primi 10 anni di vita. Dunque, si evince una stabilizzazione fino a circa il venticinquesimo anno di età, mentre si registra una lieve crescita fino al quarantesimo anno di età; infine, il tasso di guasto torna ad essere stabile fino alla conclusione dell'analisi.

Per quanto riguarda l'analisi eseguita per valutare l'andamento del tasso di guasto nei primi 90 anni di vita, si denota, come per l'analisi eseguita su 50 anni, una decrescita iniziale, una stabilizzazione fino al sessantacinquesimo-settantesimo anno di età e una marcata crescita finale. Tale andamento porterebbe a pensare che le dighe sono soggette al classico andamento del tasso di guasto a vasca da bagno. Guasti infantili nei primi quattro anni di età, guasti casuali fino al sessantacinquesimo-settantesimo anno di età e guasti dovuti ad usura a partire dall'ultimo quarto di vita, considerando che la loro vita di progetto è calcolata pari a cento anni. In realtà, dalle analisi conodotte successivamente in cui vengono analizzate le dighe per tipologia costruttiva, "dighe in muratura" e "dighe in terra", e in funzione delle dimensioni del corpo diga: "grandi dighe" e "piccole dighe", si intuisce che tale andamento appena descritto è fortemente influenzato dalla maggioranza di dighe in terra e piccole dighe presenti all'interno dei due database utilizzati per le analisi statistiche. Infatti, risulta evidente come l'andamento del tasso di guasto e di conseguenza i valori di affidabilità assumano un andamento molto differente in funzione della tipologia di dighe analizzate. Le "piccole dighe" rispecchiano l'andamento generale, invece, le "grandi dighe" mostrano un andamento differente, prima decrescente e poi stabile, a sottolineare un invecchiamento diverso non soggetto a guasti per usura, ma a soli guasti casuali. Nello specifico, le analisi eseguite sulle piccole dighe, sulle dighe in terra e sulle piccole dighe in terra, riportano un comportamento del tasso di guasto analogo a quello ricavato per il caso generico. Le analisi eseguite sulle grandi dighe, dighe in muratura, grandi dighe in terra e grandi dighe in muratura, mostrano un andamento del rateo di guasto decrescente nei primi anni di vita e stabile fino alla conclusione del periodo di osservazione. Sulla base dei risultati ottenuti si è deciso di applicare il modello esponenziale, alle grandi dighe al fine di avere uno strumento matematico in grado di predire i valori di affidabilità nel tempo. Tale modello, ad un parametro rileva, in funzione dei valori stimati del MTTF, che le grandi dighe in muratura risultano essere più affidabili nel tempo rispetto alle grandi dighe in terra. Ovviamente, i risultati ottenuti vanno interpretati come un primo approccio alla teoria dell'affidabilità e analizzati in maniera puramente ipotetica. Basti pensare che delle 3.223 dighe soggette a incidenti, si possono usare solamente 1.550 dighe ai fini statistici e che il potenziale campione composto da 70.561 dighe viene utilizzato in maniera ridotta a 46.555 dighe, a causa della mancanza di informazioni sull'anno di costruzione. Per gli sviluppi futuri occorre andare a ricercare l'anno di costruzione delle dighe presenti all'interno dei due database e integrare il database incidenti con gli incidenti avvenuti dal 2018 al 2021, in modo tale da rendere il campione più consistente. Inoltre, sfruttando il diagramma a blocchi di affidabilità si potrebbe ricavare un modello matematico in grado di stimare con maggior precisione i valori di affidabilità nel tempo. Ciò sarebbe possibile individuando per ogni sottosistema o componente che definisce il sistema diga (lo sfioratore superficiale, lo scarico di fondo, il corpo diga, ecc) un modello in grado di prevedere i valori di affidabilità nel tempo. Utilizzando delle relazioni logiche/fisiche tra i vari sottosistemi capire come collegare questi tra loro, ad esempio usando dei collegamenti in serie o in parallelo e se il sistema è complesso utilizzare collegamenti misti, in serie e paralleli. Il diagramma a blocchi di affidabilità permette la valutazione dell'affidabilità del sistema anche qualora alcuni componenti funzionino parzialmente. Ogni componente può essere visto come un interruttore che quando è chiuso, vuol dire che non funziona, traducibile in valori di affidabilità bassi, quando è aperto funziona correttamente, e traccia valori di affidabilità elevati; quando è parzialmente aperto, traccia valori di affidabilità medio alti e funziona in maniera parziale. Concludendo, la teoria dell'affidabilità applicata alle dighe potrebbe permettere di valutare in maniera preventiva interventi manutentivi atti a mantenere il corretto e sicuro funzionamento delle dighe, oltre a studiare e successivamente realizzare opere in grado di aumentare i valori di affidabilità nel tempo e quindi ad allungare la vita di esercizio delle dighe.

INDICE DELLE FIGURE

Figura	1.1 - Densità probabilità di guasto	5
Figura	1.2 - Distribuzione di probabilità di guasto	6
Figura	1.3 - Affidabilità	7
Figura	1.4 - Grafico a vasca da bagno	15
Figura	1.5 – Vasca da bagno, presenti tutte e tre le fasi, sistemi complessi	16
Figura	1.6 - Usura lenta crescente	16
Figura	1.7 – Mortalità finale, componenti meccanici soggetti a usura nella pa	arte
finale d	li vita	17
Figura	1.8 - Guasti dovuti a incidenti casuali	17
Figura	1.9 – Inizialmente crescente poi stabile	18
Figura	1.10 – Mortalità infantile elevata seguita da guasti casuali	18
Figura	1.11 - Funzione di Weibull	20
Figura	1.12 - Esempio di RBD	24
Figura	1.13 - Sistema in serie	25
Figura	1.14 - Sistema in parallelo	28
Figura	1.15 - Sistema parallelo standby	29
Figura	1.16 - Sistema (k, n)	33
Figura	2.1 - Principali elementi e grandezze di una diga secondo la vige	ente
normat	iva italiana	.37
Figura	2.2 - Esempio curva dei volumi cumulati per regolazione totale	39
Figura	2.3 - Esempio di idrogramma e curva dei volumi cumulati per regolazi	one
con sfi	oro	.41
Figura	2.4 - DEM, in formato raster	.42
Figura	2.5 - Curva dei volumi.	.42
Figura	2.6 - Diga a gravità, Quaira (Italia)	.43
Figura	2.7 - Diga ad arco, Val Malvaglia (Svizzera)	.44
Figura	2.8 – Diga ad arco-gravità, Ridracoli (Italia)	.45
Figura	2.9 - Diga ad arco a doppia curvatura, Gordon (Australia)	.45
Figura	2.10 – Diga a speroni, Gioveretto (Italia)	46

Figura	2.11 - Diga in terra, Diga di Resia (Italia)	47
Figura	2.12 - Diga in pietrame Mattmark (Svizzera)	47
Figura	2.13 – Diga in terra con manto di rivestimento artificiale, Diga Zoo	ccolo
(Italia)		48
Figura	2.14 - Diga in pietrame alla rinfusa, Lago Verde (Italia)	48
Figura	2.15 – Cassa di espansione in linea	49
Figura	2.16 - Traversa fluviale mobile, fiume Sele	50
Figura	2.17 - Scarico di fondo, diga del Vajont	51
Figura	2.18 - Scarico di mezzofondo	52
Figura	2.19 - Scarico di esaurimento, diga Ca'Selza	52
Figura	2.20 – Sistema di scarico con doppia paratoia	54
Figura	2.21 - Profilo sfioratore superficiale a soglia fissa	55
Figura	2.22 - Sfioratore superficiale a soglia fissa a zig-zag, Diga di Ceresole	Reale
		56
Figura	2.23 - Schema di funzionamento scarico a sifone	56
Figura	2.24 - Paratoia a ventola sostenuta	57
Figura	2.25 - Paratoia a ventola automatica	58
Figura	2.26 - Paratoia a settore	59
Figura	2.27 - Paratoia piana	59
Figura	2.28 - Schema di funzionamento sfioratore a calice	61
Figura	2.29 - Sfioratore a calice, diga di Pontesei	61
Figura	2.30 - Vasca per la dissipazione dell'energia cinetica della corrente	62
Figura	2.31 - Schema funzionale torrino di presa	64
Figura	2.32 - Particolari costruttivi	65
Figura	2.33 - Strumenti per il controllo delle dighe	67
Figura	2.34 – Overtopping, Lake Delhi Dam	68
Figura	2.35 – Tipici processi di collasso	70
Figura	2.36 – Processo erosivo che porta al collasso della parte sommitale	71
Figura	2.37 – Effetti del sisma	73
Figura	2.38 – Erosione interna per problemi di filtrazione	74
Figura	3.1 - Foglio excel database completo NPDP+FEMA	80
Figura	3.2 – Numero di dighe per Stato	81

Figura 3.3 – Numero di dighe costruite per anno, dal 1640 al 201682
Figura 3.4 – Numero di dighe per tipologia costruttiva dello sbarramento82
Figura 3.5 – Numero di dighe realizzate per funzionalità
Figura 3.6 – Numero dighe per volume massimo invasabile
Figura 3.7 – Numero di dighe per altezza
Figura 3.8 - Distribuzione "Piccole dighe" e "Grandi dighe"
Figura 3.9 - Prima parte dei dati contenuti nel database incidenti dighe85
Figura 3.10 - Seconda parte dei dati contenuti nel database incidenti dighe85
Figura 3.11 – Numero di incidenti per Stato (dighe USA)86
Figura 3.12 - Numero dighe soggete ad incidenti per anno di costruzione (dighe
USA)87
Figura 3.13 - Numero di incidenti avvenuti per anno, dal 1850 al 2017. (dighe
USA)87
Figura 3.14 – Distribuzione incidenti per Tipologia costruttiva (dighe USA)87
Figura 3.15 - Numero di incidenti per causa generica (dighe USA)88
Figura 3.16 - Numero di incidenti per causa specifica (dighe USA)88
Figura 3.17 – Distribuzione incidenti su "Piccole dighe" e "Grandi dighe" (dighe
USA)89
Figura 3.18 – Numero incidenti per stato ("Piccole dighe" USA)89
Figura 3.19- Numero "Piccole dighe" USA soggete ad incidenti per anno di
costruzione90
Figura 3.20 - Numero di incidenti avvenuti per anno, dal 1850 al 2017. ("Piccole
dighe" USA)90
Figura 3.21 – Distribuzione incidenti per Tipologia costruttiva ("Piccole dighe"
USA)90
Figura 3.22 - Numero di incidenti per causa generica ("Piccole dighe" USA)91
Figura 3.23 - Numero di incidenti per causa specifica ("Piccole dighe" USA)91
Figura 3.24 - Distribuzione incidenti per stato ("Grandi dighe" USA)92
Figura 3.25 - Numero "Grandi dighe" USA soggete ad incidenti per anno di
costruzione 92
Figura 3.26 - Numero di incidenti avvenuti per anno, dal 1868 al 2017. ("Grandi
dighe" USA)

Figura	3.27 - Distribuzione incidenti per Tipologia costruttiva ("Grandi digh	e'
USA).		93
Figura	3.28 - Numero di incidenti per causa generica ("Grandi dighe" USA)9	93
Figura	3.29 - Numero di incidenti per causa specifica ("Grandi dighe" USA)9	94
Figura	4.1 – Distribuzione campione	98
Figura	4.2 – Analisi per i primi 10 anni di vita	99
Figura	4.3 – Tasso di guasto, analisi per i primi 10 anni di vita	99
Figura	4.4 – Affidabilità, analisi per i primi 10 anni di vita10	00
Figura	4.5 – Guastabilità, analisi per i primi 10 anni di vita	00
Figura	4.6 – Analisi per i primi 50 anni di vita	01
Figura	4.7– Tasso di guasto, analisi per i primi 50 anni di vita	01
Figura	4.8 – Affidabilità, analisi per i primi 50 anni di vita10	02
Figura	4.9 – Guastabilità, analisi per i primi 50 anni di vita	02
Figura	4.10 – Analisi per i primi 90 anni di vita	03
Figura	4.11 – Tasso di guasto, analisi per i primi 90 anni di vita10	03
Figura	4.12 – Affidabilità, analisi per i primi 90 anni di vita	04
Figura	4.13 – Guastabilità, analisi per i primi 90 anni di vita10	04
Figura	4.14 – (Piccole dighe), analisi per i primi 10 anni di vita10	05
Figura	4.15 – Tasso di guasto (Piccole dighe), analisi per i primi 10 anni di vi	ita
	10	05
Figura	4.16 – Affidabilità (Piccole dighe), analisi per i primi 10 anni di vita10	06
Figura	4.17 – Guastabilità (Piccole dighe), analisi per i primi 10 anni di vita 10	06
Figura	4.18 – (Piccole dighe), analisi per i primi 50 anni di vita10	07
Figura	4.19 – Tasso di guasto (Piccole dighe), analisi per i primi 50 anni di vi	ita
	10	07
Figura	4.20 – Affidabilità (Piccole dighe), analisi per i primi 50 anni di vita10	08
Figura	4.21 – Guastabilità (Piccole dighe), analisi per i primi 50 anni di vita 10	08
Figura	4.22 – (Piccole dighe), analisi per i primi 90 anni di vita10	09
Figura	4.23 – Tasso di guasto (Piccole dighe), analisi per i primi 90 anni di vi	ita
	10	09
Figura	4.24 – Affidabilità (Piccole dighe), analisi per i primi 90 anni di vita1	10
Figura	4.25 – Guastabilità (Piccole dighe), analisi per i primi 90 anni di vita1	10

Figura	4.26 – (Grandi dighe), analisi per i primi 10 anni di vita	111
Figura	4.27 – Tasso di guasto (Grandi dighe), analisi per i primi 10 anni di	vita
		111
Figura	4.28 – Affidabilità (Grandi dighe), analisi per i primi 10 anni di vita	112
Figura	4.29 – Guastabilità (Grandi dighe), analisi per i primi 10 anni di vita	112
Figura	4.30 – (Grandi dighe), analisi per i primi 50 anni di vita	113
Figura	4.31 - Tasso di guasto (Grandi dighe), analisi per i primi 50 anni di	vita
		113
Figura	4.32 – Affidabilità (Grandi dighe), analisi per i primi 50 anni di vita	114
Figura	4.33 – Guastabilità (Grandi dighe), analisi per i primi 50 anni di vita	114
Figura	4.34 – (Grandi dighe), analisi per i primi 90 anni di vita	115
Figura	4.35 - Tasso di guasto (Grandi dighe), analisi per i primi 90 anni di	vita
		115
Figura	4.36 – Affidabilità (Grandi dighe), analisi per i primi 90 anni di vita	116
Figura	4.37- Guastabilità (Grandi dighe), analisi per i primi 90 anni di vita	116
Figura	4.38 – Distribuzione campione (Dighe in terra)	117
Figura	4.39 – (Dighe in terra), analisi per i primi 10 anni di vita	118
Figura	4.40 - Tasso di guasto (Dighe in terra), analisi per i primi 10 anni di	vita
		118
Figura	4.41 – Affidabilità (Dighe in terra), analisi per i primi 10 anni di vita	119
Figura	4.42 – Guastabilità (Dighe in terra), analisi per i primi 10 anni di vita	119
Figura	4.43 – (Dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di vita	120
Figura	4.44 - Tasso di guasto (Dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di	vita
		120
Figura	4.45 – Affidabilità (Dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di vita	121
Figura	4.46 – Guastabilità (Dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di vita	121
Figura	4.47 – (Dighe in terra), analisi per i primi 90 anni di vita	122
Figura	4.48 – Tasso di guasto (Dighe in terra), analisi per i primi 90 anni di	vita
		122
Figura	4.49 – Affidabilità (Dighe in terra), analisi per i primi 90 anni di vita	123
Figura	4.50 – Guastabilità (Dighe in terra), analisi per i primi 90 anni di vita	123
Figura	4.51– (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 10 anni di vita	124

Figura	4.52 – Tasso di guasto (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 10 anni di
vita	124
_	4.534.54 – Affidabilità (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 10 anni
di vita	125
Figura	4.55 – Guastabilità (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 10 anni di
vita	125
Figura	4.56 – (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di vita126
Figura	4.57 – Tasso di guasto (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di
vita	126
_	4.58 – Affidabilità (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di vita
	127
_	4.59 – Guastabilità (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di
vita	127
Figura	4.60 – (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 90 anni di vita128
Figura	4.61 – Tasso di guasto (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 90 anni di
vita	
_	4.62– Affidabilità (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 90 anni di vita
_	4.63 – Guastabilità (Piccole dighe in terra), analisi per i primi 90 anni di
_	4.64 – (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 10 anni di vita130
_	4.65 – Tasso di guasto (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 10 anni di
_	4.66 – Affidabilità (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 10 anni di vita
_	4.67 – Guastabilità (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 10 anni di vita
•	4.68– (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di vita
_	4.69 – Tasso di guasto (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di
_	4.70 – Affidabilità (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di vita
	133

Figura	4.71 – Guastabilità (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 50 anni di vita
Figura	4.72 – (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 90 anni di vita134
Figura	4.73 – Tasso di guasto (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 90 anni d
vita	
Figura	4.74 – Affidabilità (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 90 anni di vita
Figura	4.75 – Guastabilità (Grandi dighe in terra), analisi per i primi 90 anni di vita
Figura	4.76 – Distribuzione campione (Dighe in muratura)
Figura	4.77 – (Dighe in muratura), analisi per i primi 10 anni di vita137
Figura	4.78 – Tasso di guasto (Dighe in muratura), analisi per i primi 10 anni d
vita	
Figura	4.79 – Affidabilità (Dighe in muratura), analisi per i primi 10 anni di vita
Figura	4.80 - Guastabilità (Dighe in muratura), analisi per i primi 10 anni di vita
Figura	4.81 – (Dighe in muratura), analisi per i primi 50 anni di vita139
Figura	4.82 – Tasso di guasto (Dighe in muratura), analisi per i primi 50 anni d
vita	
Figura	4.83 – Affidabilità (Dighe in muratura), analisi per i primi 50 anni di vita
	140
Figura	4.84 - Guastabilità (Dighe in muratura), analisi per i primi 50 anni di vita
	140
Figura	4.85 – (Dighe in muratura), analisi per i primi 90 anni di vita141
Figura	4.86 – Tasso di guasto (Dighe in muratura), analisi per i primi 90 anni d
vita	141
Figura	4.87 – Affidabilità (Dighe in muratura), analisi per i primi 90 anni di vita
	142
Figura	4.88 – Guastabilità (Dighe in muratura), analisi per i primi 90 anni di vita
	142
	4.89 – (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 10 anni di vita.

Figura	4.90 – Tasso di guasto (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 10
anni di	vita
Figura	4.91 – Affidabilità (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 10 anni
di vita	144
Figura	4.92 – Guastabilità (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 10 anni
di vita	144
Figura	4.93 – (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 50 anni di vita145
Figura	4.94 - Tasso di guasto (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 50
anni di	vita
Figura	4.95 - Affidabilità (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 50 anni di
vita	146
Figura	4.96 - Guastabilità (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 50 anni
di vita	146
Figura	4.97 – (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 90 anni di vita147
Figura	4.98 - Tasso di guasto (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 90
anni di	vita147
Figura	4.99 – Affidabilità (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 90 anni
di vita	148
Figura	4.100 – Guastabilità (Piccole dighe in muratura), analisi per i primi 90 anni
di vita	148
Figura	4.101 – (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 10 anni di vita149
Figura	4.102 - Tasso di guasto (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 10
anni di	vita149
Figura	4.103 – Affidabilità (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 10 anni
di vita	
Figura	4.104 – Guastabilità (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 10 anni
di vita	
Figura	4.105 – (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 50 anni di vita151
Figura	4.106 - Tasso di guasto (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 50
anni di	vita
Figura	4.107 - Affidabilità (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 50 anni
di vita	

Figura	4.108 - Guastabilità (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 50 anni
di vita	
Figura	4.109 – (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 90 anni di vita153
Figura	4.110 - Tasso di guasto (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 90
anni di	vita
Figura	4.111 – Affidabilità (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 90 anni
di vita	
Figura	4.112 – Guastabilità (Grandi dighe in muratura), analisi per i primi 90 anni
di vita	

Script file MATLAB

clear all

close all

%%CARICO I FILE

File1=xlsread('DatabaseUSA.xlsx');

File2=xlsread('Database incidenti solo dighe statunitensi.xlsx'); %in aggiornamento continuo sto cercando sempre piu dati

%%ESTRAGGO LE VARIABILI File1

Anno fondazione database NPDN FEMA=File1(:,10);

%%ESTRAGGO LE VARIABILI File2

Anno_fondazione_database_incidenti=File2(:,7);

Anno incidente database incidenti=File2(:,16);

Eta guasto database incidenti=File2(:,8);

Causa specifica database incidenti=File2(:,14);

%CONTEGGIO DIGHE PRIMA DI ELIMINARE NaN (dati non noti)

Numero_dighe_database_NPDN_FEMA=length(Anno_fondazione_database_NP DN FEMA);

Numero_dighe_database_incidenti=length(Anno_fondazione_database_incidenti); Percentuale_incidenti=Numero_dighe_database_incidenti/Numero_dighe_database e NPDN FEMA*100;

fprintf('\nINFORMAZIONI GENERALI DATABASE NPDN+FEMA E DATABASE INCIDENTI');

fprintf('\nNumero totale dighe all"interno del database NPDN+FEMA= n=%i [-] \n',Numero dighe database NPDN FEMA);

fprintf('Numero incidenti dighe all''interno del database incidenti (solo dighe

USA)= n=%i [-] \n',Numero_dighe_database_incidenti); fprintf('Percentuale dighe soggette a incidenti

n=%.2f%%\n',Percentuale incidenti);

%CONTEGGIO DIGHE PER CUI SI CONOSCE L'ANNO DI COSTRUZIONE eliminazione dati mancanti DPNP FEMA =

Anno_fondazione_database_NPDN_FEMA(~isnan(Anno_fondazione_database_NPDN_FEMA));

Numero_dighe_per_cui_si_conosce_fondazione_DPNP_FEMA=length(eliminazi one_dati_mancanti_DPNP_FEMA);

eliminazione_dati_mancanti_incidenti=Anno_fondazione_database_incidenti(~isn an(Anno fondazione database incidenti));

eliminazione_dati_mancanti_eta_guasto=Eta_guasto_database_incidenti(~isnan(E ta guasto database incidenti));

eliminazione_dati_mancanti_anno_incidente=Anno_incidente_database_incidenti (~isnan(Anno incidente database incidenti));

Numero_dighe_per_cui_si_conosce_fondazione_incidenti=length(eliminazione_d ati mancanti incidenti);

```
Percentuale incidenti 1=Numero dighe per cui si conosce fondazione inciden
ti/Numero dighe per cui si conosce fondazione DPNP FEMA*100;
fprintf('\nINFORMAZIONI SULLA PRESENZA DELL"ANNO DI
COSTRUZIONE');
fprintf('\nNumero dighe all''interno del database NPDN+FEMA per cui si conosce
l"anno di costruzione= n=%i [-]
\n', Numero dighe per cui si conosce fondazione DPNP FEMA);
fprintf('Numero dighe all"interno del database incidenti per cui si conosce l"anno
di costruzione= n=%i [-]
\n', Numero dighe per cui si conosce fondazione incidenti);
fprintf('Percentuale dighe soggette a incidenti per cui si conosce l''anno di
costruzione n=%.2f%%\n',Percentuale incidenti 1);
%INCIDENTI SOTTO L'ANNO DI VITA, VENGONO CONSIDERATI NEL
PRIMO ANNO DI VITA
for c=1:length(eliminazione dati mancanti eta guasto)
  if eliminazione dati mancanti eta guasto(c)==0
   eliminazione dati mancanti eta guasto(c)=1;
  else
  end
end
%NUMERO DIGHE PER ANNO DI COSTRUZIONE DATABASE
NPDN+FEMA
Anno di fondazione ordinato NPDN FEMA=sort(eliminazione dati mancanti
DPNP FEMA);
ttt=[min(Anno di fondazione ordinato NPDN FEMA):max(Anno di fondazion
e ordinato NPDN FEMA)];
for j=1:length(ttt)
for i=1:length(Anno di fondazione ordinato NPDN FEMA)
  if Anno di fondazione ordinato NPDN FEMA(i)==ttt(j)
   contatore1(i,j)=1;
  else
    contatore1(i,j)=0;
  end
end
end
Numero di dighe per anno di costruzione NPDN FEMA=sum(contatore1);
%DISTRIBUZIONE INCIDENTI PER ANNO DI COSTRUZIONE
Anno di fondazione ordinato incidenti=sort(eliminazione dati mancanti incide
nti):
tttt=[min(Anno di fondazione ordinato incidenti):max(Anno di fondazione or
dinato incidenti)];
for i=1:length(tttt)
for i=1:length(Anno di fondazione ordinato incidenti)
  if Anno di fondazione ordinato incidenti(i)==tttt(j)
   contatore2(i,j)=1;
```

```
else
    contatore2(i,j)=0;
  end
end
end
Numero di dighe per anno di costruzione incidenti=sum(contatore2);
%DISTRIBUZIONE INCIDENTI PER ANNO DI AVVENIMENTO
Anno di guasto ordinato incidenti=sort(eliminazione dati mancanti anno inci
dente);
ttttt=[min(Anno di guasto ordinato incidenti):max(Anno di guasto ordinato in
cidenti)];
for j=1:length(ttttt)
for i=1:length(Anno di guasto ordinato incidenti)
  if Anno di guasto ordinato incidenti(i)==ttttt(j)
    contatore5(i,j)=1;
  else
    contatore5(i,j)=0;
  end
end
end
Numero di dighe per anno di guasto=sum(contatore5);
figure('Name','Per le sole dighe di cui si conosce l''anno di
costruzione', 'Numbertitle', 'off')
subplot(3,1,1)
bar(ttt, Numero di dighe per anno di costruzione NPDN FEMA)
title("Numero dighe per anno di costruzione database NPDN+FEMA")
vlabel('n^{\circ}(-)')
xlabel('t(anni)')
subplot(3,1,2)
bar(tttt, Numero di dighe per anno di costruzione incidenti)
title("Distribuzione incidenti per anno di costruzione")
vlabel('n°(-)')
xlabel('t(anni)')
subplot(3,1,3)
bar(ttttt,Numero di dighe per anno di guasto)
title("Distribuzione incidenti per anno di avvenimento")
ylabel('n^{\circ}(-)')
xlabel('t(anni)')
%PREPARAZIONE DATI IN FUNZIONE DEL PERIODO DI
OSSERVAZIONE
fprintf('\n....ANDAMENTO TASSO DI GUASTO....\n (GLOBALE
CONSIDERANDO: PICCOLE E GRANDI DIGHE; TUTTE LE TIPOLOGIE DI
INCIDENTE; TUTTE LE TIPOLOGIE DI SBARRAMENTO)');
tA=input(\nInserire il valore temporale di osservazione (in anni) per il quale si
vuole conoscere l'andamento del tasso di guasto\nt=');
```

```
for i=1:length(eliminazione dati mancanti incidenti)
  if 2018-eliminazione dati mancanti incidenti(i)>=tA
Eta guasto database incidenti new(i)=eliminazione dati mancanti eta guasto(i
  else
  end
end
for j=1:tA
for i=1:length(Eta guasto database incidenti new)
  if Eta guasto database incidenti new(i)==i
     contatore3(i,j)=1;
  else
    contatore3(i,j)=0;
  end
end
end
Numero guasti per anno=sum(contatore3);
for j=1:length(eliminazione dati mancanti DPNP FEMA)
  if 2018-eliminazione dati mancanti DPNP FEMA(j)>=tA
    contatore4(i)=1;
  else
    contatore4(i)=0;
  end
end
Campione=sum(contatore4);
fprintf('\nINFORMAZIONI SUI DATI PRESI IN CONSIDERAZIONE PER
L"ANALISI');
fprintf('\nNumero dighe che hanno più di %i anni all"interno del database
NPDN+FEMA n=\%i[-]\n',tA,Campione);
fprintf('Numero dighe che hanno più di %i anni e hanno subito un incidente prima
dei %i anni n=%i[-]\n',tA,tA,sum(Numero guasti per anno));
fprintf('Percentuale dighe che hanno più di %i anni e hanno subito un incidente
prima dei %i anni
n=%.2f%%\n',tA,tA,(sum(Numero guasti per anno)/Campione*100));
%CALCOLO CUMULATA GUASTI
Cumulata guasti(1)=Numero guasti per anno(1);
for l=2:tA
 Cumulata guasti(l)=Cumulata guasti(l-1)+Numero guasti per anno(l);
%calcolo componenti funzionanti dopo n anni
for l=1:tA
dighe funzionanti(1)=Campione-Cumulata guasti(1);
```

end

```
figure('Name', 'Andamento incidenti in funzione del tempo di osservazione
considerato ','Numbertitle','off')
subplot(3,1,1)
bar(Numero guasti per anno)
title("Numero dighe guaste per anno")
ylabel('ng^{\circ}(-)')
xlabel('t(anni)')
subplot(3,1,2)
bar(Cumulata guasti)
title("Numero dighe guaste dopo n-anni ")
ylabel('ng°(-)')
xlabel('t(anni)')
subplot(3,1,3)
bar(dighe funzionanti)
title("Numero dighe funzionanti dopo n-anni")
ylabel('ng^{\circ}(-)')
xlabel('t(anni)')
%CALCOLO AFFIDABILITA'
%calcolo affidabilità
for l=1:tA
 R(1)=dighe funzionanti(1)/Campione;
end
%CALCOLO PROBABILITÀ CUMULATA DI GUASTO
for z=1:tA
  F(z)=1-R(z);
end
%CALCOLO TASSO DI GUASTO
TG(1)=Numero guasti per anno(1)/Campione;
for l=2:tA
 TG(l)=Numero guasti per anno(l)/dighe funzionanti(l-1);
%CALCOLO DENSITÀ DI PROBABILITÀ
for l=1:tA
 %f(1)=Numero guasti per anno(1)/Campione;
 f(1)=TG(1)*R(1);
end
figure('Name','Probabilità cumulata di guasto','Numbertitle','off')
plot(F,'-')
title("Probabilità cumulata di guasto")
ylabel('F(-)')
xlabel('t(anni)')
```

```
figure('Name','Affidabilità','Numbertitle','off')
plot(R,'-r');
title("Affidabilità")
ylabel('R(-)')
xlabel('t(anni)')
figure('Name','Tasso di guasto','Numbertitle','off')
plot(TG,'-g');
title("Tasso di guasto")
ylabel('TG(-)')
xlabel('t(anni)')
figure('Name','Funzione di densità di probabilità','Numbertitle','off')
plot(f,'-');
title("Funzione di densità di probabilità")
ylabel('f(-)')
xlabel('t(anni)')
```

BIBLIOGRAFIA

TESTI

ROZZI, Teoria dell'affidabilità, capitolo 3, [LaSI-Unimore]

C.KAPUR & M. PECHT, 2014, *Reliability Engineering*, [John Wiley & Sons, Incorporated].

L.DA PEPPO & P. SALADIN, 2017, Opere di scarico e prese per dighe, traverse e canali, [Edizione progetto Padova].

L.DISTASI, 2019, *Analisi a scala mondiale degli incidenti su piccole e grandi dighe,* [Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino].

NORMATIVE

Legge 21 ottobre 1994, n. 584

Circolare P.C.M. 13 dicembre 1995, n. DSTN/2/22806

SITOGRAFIA

https://www.affarinternazionali.it/2019/09/dighe-quando-acqua-nasconde-rischi/

https://docplayer.it/60001014-Le-opere-di-scarico-dei-serbatoi.html

http://www.ingam.com/dighe/le-dighe.html

https://www.dighe.eu/normativa.htm

https://www.manualihoepli.it/media/doc/pr173.pdf