UniversiTà degli STUDI di Napoli Federico II



Dottorato di Ricerca in

SCIENZE DELLA TERRA, DELL'AMBIENTE E DELLE RISORSE

"Ciclo XXXIV"

Tesi di Dottorato in Geofisica

"Sviluppo di procedure per la verifica sperimentale di modelli di pericolosità sismica"

Tutore Ch.mo Prof. Warner Marzocchi **Dottorando** Dott. Fabio Varchetta

Co-tutore Prof. Ing. Fatemeh Jalayer "C'è una forza motrice più forte del vapore, dell'elettricità e dell'energia atomica: la volontà". A. Einstein

Sommario

CAPITOLO 1	3
1. INTRODUZIONE ALLA PROBLEMATICA SCIENTIFICA	3
1.1. PERICOLOSITA' SISMICA	3
1.1.1. APPLICAZIONI PSHA: REALIZZAZIONE DI MODELLI PERICOLOSITA'	DI 11
1.1.2. TEST DEI MODELLI DI PERICOLOSITA' CON I INDIPENDENTI	DATI 17
1.2. VULNERABILITA' SISMICA	19
1.2.1. EQUAZIONE DEL ROCKING	19
1.2.2. CURVE DI FRAGILITA'	23
1.3. RISCHIO SISMICO	26
CAPITOLO 2	29
CREAZIONE DEL DATASET	29
2.1. SVILUPPO METODOLOGIA TEST ATTENDIBILITA' MODELL PERICOLOSITA' E CREAZIONE DEL DATASET	I DI 29
CAPITOLO 3	46
CAPITOLO 3 CALCOLO DEL RISCHIO SISMICO	46 46
CAPITOLO 3 CALCOLO DEL RISCHIO SISMICO	46 46 46
CAPITOLO 3 CALCOLO DEL RISCHIO SISMICO	. 46 46 46 50
 CAPITOLO 3 CALCOLO DEL RISCHIO SISMICO. 3.1. IDENTIFICAZIONE DELLA CLASSE DI SUOLO. 3.2. CURVE DI PERICOLOSITA'. 3.3. RICERCA DELLE CURVE DI FRAGILITA' E VERIFICHE PEL LORO UTILIZZO. 	46 46 50 R IL 56
 CAPITOLO 3 CALCOLO DEL RISCHIO SISMICO. 3.1. IDENTIFICAZIONE DELLA CLASSE DI SUOLO. 3.2. CURVE DI PERICOLOSITA'. 3.3. RICERCA DELLE CURVE DI FRAGILITA' E VERIFICHE PEI LORO UTILIZZO. 3.4. VERIFICA DEI RISULTATI E VALIDAZIONE DEI MODELL PERICOLOSITA'. 	46 46 50 R IL 56 I DI 83
 CAPITOLO 3 CALCOLO DEL RISCHIO SISMICO. 3.1. IDENTIFICAZIONE DELLA CLASSE DI SUOLO. 3.2. CURVE DI PERICOLOSITA'. 3.3. RICERCA DELLE CURVE DI FRAGILITA' E VERIFICHE PEI LORO UTILIZZO. 3.4. VERIFICA DEI RISULTATI E VALIDAZIONE DEI MODELL PERICOLOSITA'. CAPITOLO 4 	46 46 50 R IL 56 I DI 83 87
 CAPITOLO 3 CALCOLO DEL RISCHIO SISMICO. 3.1. IDENTIFICAZIONE DELLA CLASSE DI SUOLO. 3.2. CURVE DI PERICOLOSITA'. 3.3. RICERCA DELLE CURVE DI FRAGILITA' E VERIFICHE PEI LORO UTILIZZO. 3.4. VERIFICA DEI RISULTATI E VALIDAZIONE DEI MODELL PERICOLOSITA'. CAPITOLO 4 ANALISI DEI RISULTATI PER MPS04. 	46 46 50 R IL 56 I DI 83 87
 CAPITOLO 3 CALCOLO DEL RISCHIO SISMICO. 3.1. IDENTIFICAZIONE DELLA CLASSE DI SUOLO. 3.2. CURVE DI PERICOLOSITA'. 3.3. RICERCA DELLE CURVE DI FRAGILITA' E VERIFICHE PEI LORO UTILIZZO. 3.4. VERIFICA DEI RISULTATI E VALIDAZIONE DEI MODELL PERICOLOSITA'. CAPITOLO 4 ANALISI DEI RISULTATI PER MPS04. 4.1. PRESENTAZIONE GRAFICA DELLE FASI DI PROCESSING 	46 46 50 R IL 56 I DI 83 87 87 89
 CAPITOLO 3 CALCOLO DEL RISCHIO SISMICO. 3.1. IDENTIFICAZIONE DELLA CLASSE DI SUOLO. 3.2. CURVE DI PERICOLOSITA'. 3.3. RICERCA DELLE CURVE DI FRAGILITA' E VERIFICHE PEL LORO UTILIZZO. 3.4. VERIFICA DEI RISULTATI E VALIDAZIONE DEI MODELL PERICOLOSITA'. CAPITOLO 4 ANALISI DEI RISULTATI PER MPS04. 4.1. PRESENTAZIONE GRAFICA DELLE FASI DI PROCESSING	46 46 50 R IL 56 I DI 83 87 89 E E 96
 CAPITOLO 3 CALCOLO DEL RISCHIO SISMICO. 3.1. IDENTIFICAZIONE DELLA CLASSE DI SUOLO. 3.2. CURVE DI PERICOLOSITA' 3.3. RICERCA DELLE CURVE DI FRAGILITA' E VERIFICHE PEL LORO UTILIZZO. 3.4. VERIFICA DEI RISULTATI E VALIDAZIONE DEI MODELL PERICOLOSITA' CAPITOLO 4 ANALISI DEI RISULTATI PER MPS04. 4.1. PRESENTAZIONE GRAFICA DELLE FASI DI PROCESSING	46 46 50 R IL 56 I DI 83 87 87 89 E E E E 96 96

CAPITOLO 6	••••••		••••••	1	21
ANALISI DEI	RISULTATI PER M	PS19-TABELI	LEED	DISCUSSIONI1	21
CAPITOLO 7	•••••		•••••	1	35
VERIFICA DISCUSSION	ATTENDIBILITA' I	MODELLI	DI	PERICOLOSITA'	E 35
CONCLUSIO	NI		•••••	1	45
BIBLIOGRA	FIA		•••••	1	47
APPENDICE			•••••	1	52
RINGRAZIAN	MENTI		•••••	1	67

Abstract

L'Italia è caratterizzata da una sismicità medio-alta, che purtroppo ha causato ingenti danni da un punto di vista sociale ed economico, si vedano per esempi i terremoti dell'Aquila 2009, dell'Emilia 2012, di Amatrice-Norcia 2016 e di Casamicciola 2017.

I terremoti sono fenomeni naturali che non possono essere predetti deterministicamente, ma esistono diverse metodologie di studio per stimare la loro probabilità di accadimento che è l'ingrediente scientifico fondamentale per la riduzione del rischio sismico. In termini generali, il rischio sismico è definito come il prodotto tra la probabilità che un determinato scuotimento del terreno si verifichi in un certo intervallo di tempo (PERICOLOSITA'), il valore esposto al potenziale pericolo, sia in termini economici che in perdite di vite umane (ESPOSIZIONE), e la frazione del valore esposto che potrebbe essere perso in funzione dei diversi livelli di scuotimento del terreno (VULNERABILITA').

Nello specifico, la pericolosità sismica è una funzione di probabilità che fornisce, per ogni valore di una determinata grandezza fisica come, per esempio, l'accelerazione orizzontale del suolo, la probabilità di eccedenza, cioè la probabilità in un determinato sito e intervallo di tempo di osservare un valore superiore ad un particolare valore della grandezza considerata. Da questo tipo d'approccio è stata sviluppata la carta di pericolosità sismica. Negli ultimi anni si sono sviluppati diversi modelli di pericolosità sismica, dal modello utilizzato attualmente per l'edilizia antisismica (MPS04), al modello europeo SHARE, e ad un nuovo modello di pericolosità per l'Italia appena terminato (MPS19).

Lo scopo del progetto di ricerca è quello di verificare l'attendibilità delle stime di pericolosità sismica di questi modelli nel lungo termine. Per una corretta validazione di un modello, bisogna considerare dati indipendenti, cioè che non sono stati utilizzati per costruire i modelli di pericolosità. Nel caso considerato in questa tesi, i dati indipendenti considerati sono i monumenti storici-culturali che hanno/non hanno subito danni o meno da terremoto negli ultimi due millenni.

La metodologia proposta è simile a quella proposta in America con le *precarious rocks*. Le *precarious rocks* forniscono informazioni per quanto riguarda l'input sismico, cioè permettono di stimare l'accelerazione massima del suolo (PGA) che porta alla caduta della struttura (Shi et al.,

1996); l'esistenza o meno della struttura permette quindi di sapere se tale limite è stato (o non è stato superato).

La verifica dell'attendibilità avviene calcolando la probabilità di collasso dei monumenti, utilizzando diverse metodologie: calcolo dell'integrale del rischio sismico e un metodo semplificato denominato "Probability Based Demand and Capacity Factor (DCFD)" (Cornell et al., 2002).

Le probabilità di collasso, ottenute mediante diverse metodologie, verranno poi valutate statisticamente per decidere se in quel sito le stime di pericolosità siano realistiche o no.

In questo lavoro innovativo si descrivono le fasi della validazione di tre modelli di pericolosità, MPS04, SHARE e MPS19. I risultati ottenuti mostrano alcune componenti critiche per il raggiungimento dello scopo, come le incertezze legate al comportamento strutturale dei monumenti considerati, cioè la vulnerabilità, che gioca un ruolo chiave nella stabilità e attendibilità dei risultati.

CAPITOLO 1

1. INTRODUZIONE ALLA PROBLEMATICA SCIENTIFICA

1.1.PERICOLOSITA' SISMICA

I terremoti sono generati dalla rottura della parte fragile della parte superficiale della Terra e dalle onde elastiche generate da questa fratturazione.

Ad oggi il grande numero delle variabili fisiche che determinano l'innesco, la propagazione e l'arresto della frattura rendono il fenomeno ad oggi imprevedibile deterministicamente.

L'unica soluzione, per poterne mitigare gli effetti disastrosi e avere una giusta convivenza con l'evento, è quella di effettuare un'analisi della pericolosità sismica. Ossia, studiando la sismicità attuale e passata delle sorgenti distanti rispetto ad un sito d'interesse è possibile progettare e costruire edifici in modo che possano resistere alle accelerazioni del suolo previste.

L'analisi di pericolosità sismica considerata in questo lavoro di tesi è quella di tipo probabilistica, il cui risultato finale è una probabilità di superamento di un parametro di interesse di scuotimento del suolo, tenendo conto di tutti i possibili scenari possibili.

L'imprevedibilità dei terremoti significativi per la pericolosità sismica, sia in termini di tempo, località e magnitudo, rendono di per sé il fenomeno di tipo stocastico.

Dal punto di vista statistico il processo sismogenetico considerato nel calcolo classico della pericolosità sismica è di natura Poissoniana, ossia rispetta le seguenti caratteristiche:

- Il processo che genera i terremoti è di tipo stazionario. Ovvero un qualunque intervallo temporale di una certa durata preso a caso nell'asse dei tempi presenta le stesse caratteristiche dal punto di vista statistico.
- Gli eventi sismici avvengono in maniera indipendente tra loro. Ovvero la genesi di un evento non influenza la genesi di un futuro evento sismico.

Il modello di Poisson è descritto mediante il parametro λ che rappresenta il numero medio di eventi per l'intervallo di tempo considerato.

Se si conosce quindi il parametro λ , la probabilità di avere N eventi è data dalla seguente equazione:

$$p(N|\lambda) = \lambda^N \frac{e^{-\lambda}}{N!} \quad (1)$$

Un'analisi di PSHA si basa su tre ingredienti principali:

- Definizione della sorgente sismica
- La scelta appropriata di un modello di attenuazione delle onde sismiche generate dal terremoto
- Trattamento delle incertezze.

Lo strumento di base (ma non l'unico), quando disponibile, per la definizione e caratterizzazione delle sorgenti sismiche e la valutazione del loro tasso di sismicità è il catalogo storico, contenente la sismicità storica e moderna dei terremoti.

Per quanto riguarda la geometria delle sorgenti sismiche, si possono usare le faglie (Budnitz, et al. 1997), oppure, tenendo conto la loro forte incompletezza, si utilizzano delle aree sismo-genetiche (Cornell,1968), o sorgenti di tipo "smoothed", semplicemente riportando la distribuzione spaziale degli eventi riportati nel catalogo sismico (Akinci et al 2018).

Una volta definita la sorgente sismica, si passa alla valutazione della loro distribuzione di magnitudo e delle distanze rispetto il sito (Baker et al. 2008).

Data la possibile sorgente sismica è importante conoscere per ogni possibile terremoto generato da essa, quale è lo scuotimento del suolo atteso per il sito specifico di interesse in cui si calcola la pericolosità sismica.

Il modo in cui lo scuotimento del terreno è generato da ogni sorgente sismica è stimato, solitamente, da relazioni empiriche, ottenute da tecniche di minimi quadrati applicate alle osservazioni di migliaia di registrazioni sismiche (Breiman and Friedman, 1985).

Le relazioni di attenuazione o equazioni predittive sono utilizzate in molti paesi e sono definite GMPE (*Ground Motion Prediction Equation*).

Le relazioni più semplici sono espresse da equazioni di questo tipo:

 $\log Z = A + BM + C \log R \quad (2)$

L'equazione numero 2 indica che qualsiasi parametro di moto al suolo (Z) dipende soltanto dalla magnitudo M dell'evento e dalla distanza R tra il sito e il terremoto. Questa relazione di questo tipo è caratterizzata da un'elevata incertezza.

Un esempio di legge di questo tipo è quella di Boore, Joyner, and Fumal (1997), rappresentata dalla figura 1.



Fig.1: Legge d'attenuazione di Boore, Joyner, and Fumal (1997), dove la curva rossa rappresenta la curva mediana di PGA, la distribuzione di probabilità in blu rappresenta l'incertezza nella legge di attenuazione.

Per ridurre l'incertezza, le recenti leggi d'attenuazione tengono conto anche di altri aspetti della sorgente sismica e presentano la seguente forma:

$$log10Z = e1 + FD(R, M) + FM(M) + FS + Fsof$$
(3)

dove el è una costante, mentre FD (R, M), FM (M), *FS* e *Fsof* rappresentano rispettivamente le funzioni di distanza, magnitudo, funzione d'amplificazione del sito e funzione legata al meccanismo di frattura che ha generato il terremoto (distensivo, trascorrente o inverso).

Un esempio di legge d'attenuazione di questo tipo è ITA10 elaborata da Bindi e Pacor (Bindi et al. 2011).

Scelta una relazione di attenuazione, per ogni specifico evento sismico generato da tutte le sorgenti considerate, si ottiene una distribuzione di probabilità del parametro di scuotimento del terreno che interessa il sito Z.

La distribuzione di probabilità che si utilizza è quella Log-Normale (eq.4) avente come media ($\mu = \log Z$) e deviazione standard ρ ottenute dalla legge d'attenuazione.

$$p_n(logZ) = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{logZ - \mu_{logZ}}{\sigma_n}\right)}$$
(4)

Per conoscere invece la probabilità di eccedenza P(Z > z | m, R) di uno specifico valore Z rispetto ad una specifica soglia, bisogna integrare l'equazione 4, ottenendo così la seguente relazione (eq.5):

$$P(Z > z | m, R) = \int_{z}^{\infty} \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\log z - \mu_{\log Z}}{\sigma_n} \right)}$$
(5)

Avendo assunto che il processo sismogenetico è di tipo Poissoniano e combinando tutte le informazioni precedenti, nell'analisi di PSHA è possibile stimare il tasso medio di eccedenza nell'unità di tempo (ad esempio, un anno) per ogni valore del parametro di scuotimento del terreno scelto (es. la peak ground acceleration, PGA, ovvero il massimo scuotimento orizzontale), considerando tutti i possibili terremoti.

Esso si ottiene applicando la seguente formulazione matematica (eq.6) che tiene conto di tutte le incertezze di ogni parametro utilizzato.

$$\lambda(Z > z) = \sum_{i=1}^{Nsorgenti} \lambda_i \int_{m} \int_{r} f_i(M) f_i(r) P[Z > z | M, r] dr dM$$
(6)

Dove:

 λ_i : è il tasso di sismicità poissoniana (tasso di ricorrenza medio) superiore ad una soglia minima di magnitudo per ogni sorgente *i*.

 $f_i(M)$: rappresenta la funzione di densità di probabilità della magnitudo per la sorgente.

 $f_i(r)$: indica la funzione di densità di probabilità delle distanze di un terremoto all'interno della sorgente, al sito d'interesse.

P[Z > z|M,r]: determina la probabilità condizionata di avere un valore d'input sismico (Z) maggiore rispetto ad una specifica soglia, in funzione della magnitudo dell'evento e dalla distanza dal sito. Questo valore di probabilità proviene dalla legge d'attenuazione. Una volta ottenuto il tasso medio di eccedenza annuo, attraverso il modello di Poisson, è possibile calcolare la probabilità di eccedenza per ogni valore di scuotimento rispetto ad un valore soglia e riferito ad un intervallo di tempo (t) prestabilito:

$$P(Z > z) = 1 - e^{-\lambda(Z > z)t}$$
 (7)

Calcolata questa probabilità per ogni possibile scuotimento si ottiene infine una curva di pericolosità sismica come quella mostrata dalla figura 2.



Fig.2. *Esempio del calcolo di una curva di hazard per un singolo sito, utilizzando come input sismico l'accelerazione orizzontale atteso al suolo (la PGA).*

Per costruire una mappa di pericolosità e per il loro utilizzo pratico è necessario scegliere una soglia della probabilità di eccedenza. La scelta di questo valore viene effettuata dai decisori per il caso di interesse e non dipende dalla realizzazione delle curve di pericolosità.

Generalmente questa soglia d'eccedenza è del 10% in 50 anni ed è stata definita per la messa in sicurezza degli edifici durante la loro vita nominale di servizio; tale scelta è stata fatta bilanciando gli aspetti di sicurezza della popolazione e valori di scuotimento del terreno che fossero gestibili per definire costruzioni antisismiche adeguate al budget economico a disposizione. Da questa soglia di probabilità, dalla curva di hazard si ricava il valore di input sismico corrispondente, per esempio l'accelerazione orizzontale (PGA), relativa a tale soglia. In base a questo valore di PGA, gli edifici devono essere progettati o riqualificati per resistere a questo valore di scuotimento.

Graficamente il valore di PGA corrispondente ad una probabilità d'eccedenza del 10% in 50 anni è mostrato dall'intersezione delle linee rosse sulla curva di hazard, ed è illustrata dalla figura numero 3.



Fig.3: Esempio di una curva di hazard per un sito, le linee rosse rappresentano il valore di PGA corrispondente alla probabilità di superamento del 10% in 50 anni. (Figura tratta dal lavoro di Gerstenberger et. al. 2020)

La curva di hazard ottenuta, applicando l'equazione numero 6 e dimostrata nella figura 2, tiene conto di tutte le possibili fonti d'incertezza.

In un'analisi di pericolosità sismica (PSHA) le incertezze si distinguono, come riportato nei lavori di bibliografia di (Budnitz et al., 1997; Thompson & Warmink, 2016) in:

- incertezza aleatoria.
- incertezza epistemica.

Per incertezza aleatoria si intende quella stima dell'errore che è intrinseca al processo ed è dovuta ad una conoscenza parziale del fenomeno in questione.

Mentre per incertezza epistemica si intende l'incertezza legata all'attuale limitata conoscenza del processo sismogenetico, il quale sarà definito attraverso un modello.

Questa incertezza può essere ridotta con l'aggiunta di nuove informazioni e con nuovi dati.

Nella pericolosità sismica la rappresentazione delle incertezze può avvenire in diversi modi. Generalmente si utilizza un approccio tradizionale come quello dell'utilizzo di un albero logico (Kulkarni et al.,1984; Abrahamson & Bommer, 2005) o quello più moderno chiamato "Ensemble modeling" (Gerstenberger et al., 2014; Marzocchi et al 2015).

Per quanto riguarda l'approccio di tipo "albero logico", esso permette di rappresentare le incertezze epistemiche mediante una struttura ad albero ramificato. Ogni ramo parte da dei nodi a cui si attribuiscono dei valori di probabilità, assegnati da degli esperti, e termina con dei modelli di pericolosità prodotti finali, ottenuti seguendo uno specifico "percorso logico".

Un esempio dell'applicazione di rappresentazione delle incertezze epistemiche mediante un albero logico è avvenuto per il modello MPS04 (Stucchi et al., 2011) ed è rappresentato dalla figura numero 4.



Fig.4: Albero logico utilizzato per il modello di pericolosità italiano MPS04 (Figura tratta dal lavoro di Stucchi et al., 2011).

Uscendo dalla logica stringente dell'albero logico, un altro metodo per rappresentare le incertezze epistemiche dei modelli di pericolosità è mediante la metodologia definita "Ensemble Modeling". Questa metodologia consiste che per ogni funzione di pericolosità calcolata in un sito, per uno specifico valore di scuotimento di terreno (IM), per esempio la PGA, si rappresentano tutte le rispettive probabilità di eccedenza di ogni curva di hazard e vedere come esse si distribuiscono. La scelta della distribuzione di probabilità che meglio descrive l'andamento delle probabilità di eccedenza è soggettiva. Il valore medio della distribuzione di probabilità scelta, rappresenta il valore rappresentativo della probabilità di eccedenza in quel sito, mentre la sua dispersione rappresenta l'incertezza epistemica.

Questa metodologia di rappresentazione dell'incertezza è stata applicata per il nuovo modello di pericolosità italiano MPS19 ed un esempio è rappresentato dalla figura 5.



Fig.5: Rappresentazione dell'incertezza epistemica mediante la metodologia "Ensemble Modelling" usata per il nuovo modello di pericolosità italiano MPS19 (figura tratta dal lavoro di Meletti et. al 2021).

È importante poter quantificare e rappresentare bene le incertezze in maniera appropriata e comprensiva, poiché rappresentano il punto di sviluppo di nuove metodologie di analisi per poterle ridurre, rendendo così le curve di hazard ancora più affidabili.

1.1.1. APPLICAZIONI PSHA: REALIZZAZIONE DI MODELLI DI PERICOLOSITA'

Uno dei modi di applicazione di analisi della PSHA è quella di realizzare modelli di pericolosità nazionali. Ossia ottenendo per ogni sito curve di pericolosità è possibile rappresentare su mappa i valori di PGA corrispondente ad una specifica soglia di probabilità di eccedenza.

In questo lavoro di tesi lo scopo è quello di verificare l'attendibilità dei modelli di pericolosità attualmente disponibili utilizzando dati indipendenti al modello stesso.

I modelli di pericolosità sismica sottoposte a test di validazione per ridurne le incertezze sono: quello nazionale italiano (MPS04) attualmente in uso per le norme tecniche di costruzioni, il modello europeo SHARE e il nuovo modello di pericolosità nazionale MPS19.

MPS04

Il modello di pericolosità MPS04 è stato rilasciato nel 2004 e ancora oggi viene utilizzato per la progettazione e messa in sicurezza degli edifici seguendo le vigenti norme tecniche di costruzioni (NTC2018).

La costruzione della carta di pericolosità sismica segue il metodo di Cornell (Cornell et al., 1968) e di seguito verranno spiegati brevemente gli elementi che hanno contribuito alla sua costruzione.

Il modello di sorgente utilizzato per realizzare la mappa di pericolosità sismica italiana è quello di tipo a zonazione. Infatti, l'Italia è stata divisa in 36 zone sismo-genetiche (ZS9) costruita sulle informazioni di dati geologici e osservazioni sismologiche dovute al catalogo storico CPTI04.

Una volta individuato dal catalogo la magnitudo di completezza, identificando così l'intervallo temporale in cui il catalogo sia completo, si è stimato per ogni zona sismogenetica la stima della Magnitudo massima e la sua legge magnitudo-frequenza. Sono state definite due tipi di magnitudo massima: la prima considerando le informazioni degli eventi storici provenienti dal catalogo e la seconda dal database delle faglie (DISS), indipendentemente dal numero degli eventi.

Infine, le leggi d'attenuazione disponibili in quegli anni erano quella europea e italiana. Esse hanno una forma tipo dell'equazione 2 e sono rispettivamente quella di (Ambraseys et al., 1996) e di Sabetta e Pugliese (Sabetta et al. 1996).

Ottenute le curve di pericolosità secondo i criteri descritti nel paragrafo precedente, la rappresentazione su mappa dei valori di PGA avente una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni è data dalla figura numero 6.



Fig.6: Mappa di pericolosità sismica italiana (MPS04).

Come è possibile notare dalla figura 6, la scelta di questa scala dei colori permette di distinguere zone più pericolose da quelle meno pericolose. In base a queste considerazioni in figura 6, le aree più pericolose sono localizzate nell'area alpina nord-orientale e lungo l'Appenino centromeridionale.

SHARE

Nel 2013 è stato rilasciato il primo modello di pericolosità europea. Questa mappa di pericolosità, seppur non venga utilizzata per le attuali norme tecniche di costruzione, rappresenta un secondo modello di pericolosità del territorio nazionale italiano.

Anche la costruzione di questa carta di pericolosità sismica segue il metodo di Cornell esposto precedentemente e quindi in questa sezione ci soffermeremo ad esporre quali sono le differenze sostanziali con MPS04 per quanto riguarda il territorio italiano.

La definizione delle aree-sorgenti per SHARE (Arvidsson e Grünthal, 2010) è stato costruito come compilazione dei modelli di aree-sorgente nazionali e/o regionali esistenti all'inizio del progetto. Quindi tranne per l'area alpina, in cui sono state create nuove zone sismo genetiche, è stata utilizzata la zonazione ZS9.

Per quanto riguarda la scelta del catalogo è stato utilizzato un catalogo storico più moderno denominato SHEEC, che differisce da CPTI014 per estensione temporale e revisione della Magnitudo nella prima parte del catalogo 1000-1899.

Una volta definita la magnitudo di completezza del catalogo, la stima della Magnitudo massima è avvenuta utilizzando le informazioni proveniente del catalogo e dal database sulle faglie attive. Visto la mole dei dati, gli autori hanno scelto di aumentare in via cautelativa la magnitudo massima, per ogni zona sismogenetica, di un fattore moltiplicativo pari al valore della propria incertezza.

La differenza principale che porta ad una differente stima di pericolosità sismica tra i due modelli è data dal tipo di legge di attenuazione utilizzate. Le relazioni predittive utilizzate in SHARE, sono varie come per esempio quella di Akkar e Bommer (2010), Cauzzi e Faccioli (2008). Esse sono funzioni più moderne e articolate, rispetto alle leggi di attenuazione disponibili all'epoca della costruzione del modello MPS04.

La rappresentazione su mappa dei valori di pericolosità di SHARE, considerando le caratteristiche esposte poco fa, è mostrata dalla figura numero 7.



Fig.7: Mappa di pericolosità sismica europea SHARE.

MPS19

Nel 2019 c'è stata la realizzazione di un nuovo modello di pericolosità sismica per il territorio italiano: MPS19.

I risultati ottenuti descritti dal lavoro di Meletti et al. 2021, rimarcano evidenti differenze in termini di approccio applicato e di risultati rispetto al modello MPS04 utilizzato attualmente per le recenti norme di costruzione.

In questo paragrafo descriveremo brevemente la metodologia utilizzata dagli autori per la realizzazione del nuovo modello di pericolosità e le differenze sostanziali rispetto al precedente modello di pericolosità italiano, MPS04.

Come per i due modelli di pericolosità esposti precedentemente, anche quest'ultimo si basa sul metodo di Cornell, in cui si forniscono in termini probabilistici le previsioni di varie misure d'intensità sismica (PGA, PGV ecc.) sul territorio italiano in uno specifico intervallo di tempo.

Rispetto al modello precedente, sono stati utilizzati numerosi dataset per la definizione della sorgente sismica e numerose relazioni predittive, modelli di attenuazione, per la determinazione dei parametri di scuotimento del suolo atteso ad ogni sito d'interesse.

In particolare, per quanto riguarda la definizione della sorgente sismica di rilevante importanza, tra i dataset di maggior rilievo è stato l'utilizzo di un nuovo catalogo storico dei terremoti: il catalogo CPTI15 (Rovida et al. 2016).

Il catalogo CPTI15 è composto da 4500 terremoti, la cui estensione temporale parte dall'anno 1000 fino al 2014. Il seguente catalogo, il quale utilizza sia dati storici e sia quelli strumentali, differisce rispetto a quello utilizzato per il modello MPS04, CPTI4, per estensione temporale e soprattutto per eventi che vanno da una magnitudo 4.5 a 5.8. Infatti, si è riscontrata una diffusa sovrastima della magnitudo e per molti eventi appartenenti a questo intervallo di magnitudo.

Successivamente, per onorare l'ipotesi di stazionarietà di Poisson, il catalogo è stato declasterizzato rimuovendo tutti i cosiddetti aftershock degli eventi principali (mainshock) che hanno causato molti danni nel nostro territorio. Successivamente una volta stimato l'intervallo di completezza, si è passato alla valutazione della magnitudo Massima considerando analoghi in altre parti del mondo, e quelle calcolate utilizzando il database delle faglie (DISS 3.2.1).

Dai dati d'input per la definizione della sorgente sismica, per il modello MPS19 rispetto a MPS04, sono stati costruiti 11 modelli di sorgenti sismica per il territorio italiano e sono così suddivisi:

- 5 modelli di tipo area sismogenetica.
- 2 modelli di tipo "smoothed seismicity", cioè una descrizione filtrata spazialmente della sismicità contenuta nei cataloghi.
- 2 modelli considerando le faglie sismogenetiche, determinato da informazione tettoniche e sfruttando dati geofisici.
- 2 modelli ricavati sfruttando i dati di deformazione attraverso dati geodetici.

In merito alle relazioni predittive del moto del suolo utilizzate in MPS19, esse sono completamente diverse rispetto a quelle utilizzate durante la costruzione di MPS04. Esse sono funzioni più moderne e articolate, poiché tengono conto oltre della Magnitudo e distanza anche della tipologia di suolo e stile della faglia. Un esempio di modelli di attenuazione utilizzate per MPS19 sono: la legge ITA 10 e CZ15 (Cauzzi et al. 2015).

Le novità proposte dagli autori, nella realizzazione del nuovo modello di pericolosità sismica italiano e che si differenziano da MPS04, sono state

quelle di effettuare diverse fasi di testing per verificare l'attendibilità dei risultati e un'accurata descrizione delle incertezze epistemiche che caratterizzano il modello di pericolosità.

In particolare, nella verifica d'attendibilità tutti i modelli di sorgente e attenuazione devono superare test statistici specifici e la loro attendibilità è stata poi quantizzata mediante l'assegnazione di un valore, definito peso.

Mentre per quanto riguarda la rappresentazione e descrizione dell'incertezza epistemica si è scelto di utilizzare l'approccio di tipo "Ensemble modeling". In questa rappresentazione, per ogni curva di pericolosità prodotta per ogni specifico sito, ottenuta dalla combinazione tra diversi modelli di sorgente e attenuazione del suolo, ad uno specifico valore di scuotimento del suolo vengono rappresentate le relative probabilità d'eccedenza. Dalla rappresentazione di queste probabilità di eccedenza, si sceglie quale distribuzione di probabilità meglio descrive il loro comportamento. Il centro di questa distribuzione dovrebbe rappresentare il miglior valore della probabilità d'eccedenza e la sua dispersione rappresenta la sua incertezza epistemica.

Gli autori hanno espresso differente rappresentazioni della pericolosità sismica su mappa del nostro territorio con questo nuovo modello. Ma coerentemente a quelli già esposti precedentemente riportiamo qui, soltanto la rappresentazione su mappa dei valori di PGA avente una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni. La mappa del nuovo modello di pericolosità MPS19 viene mostrato dalla figura 8.



Fig.8: Mappa di pericolosità sismica italiana (MPS19).

1.1.2. TEST DEI MODELLI DI PERICOLOSITA' CON DATI INDIPENDENTI

Per poter validare scientificamente un modello di pericolosità è necessario confrontare le stime del modello con dati indipendenti. I test descritti in precedenza per MPS19, per esempio, utilizzavano solo dati del catalogo sismico che erano stati utilizzati per la costruzione del modello, per cui non possono essere considerati indipendenti; in questo caso, si parla di test di consistenza del modello con i dati utilizzati, più che di vera e propria validazione. Lo scopo ultimo di questa validazione è quella di identificare possibili incertezze non ancora incluse nella costruzione del catalogo.

Un esempio di questa tipologia di test viene fatta in America considerando come dati indipendenti la presenza (o no) di *precarious rock. Le precarious rock* sono delle particolari strutture rocciose formatesi in particolari condizioni climatiche, dove la continua azione di agenti erosivi ed il weathering hanno alterato la sua struttura originale.

Un esempio di *precarious rock* è quella del Searchlight, in Nevada (USA) ed è mostrata dalla figura 9.



Fig.9: Esempio di Precarious Rock in Searchlight, Nevada (USA).

La presenza di questi assetti geologici, forniscono dei vincoli sulle accelerazioni che portano al collasso di questa struttura (Anderson et. al. 1999). Infatti, la presenza di queste strutture, nel loro tempo di formazione, indica che il valore di scuotimento che portano al loro ribaltamento ancora non sia avvenuto. Da questa assunzione, nasce l'idea di confrontare i valori di accelerazione che determinano il collasso di queste strutture e le accelerazioni attese in un sito elaborati dai modelli di pericolosità (Anderson et al. 1999).

Studi di vulnerabilità permettono di definire per queste formazioni rocciose le funzioni di fragilità. Dalla combinazione delle funzioni di fragilità di queste strutture e le funzioni di pericolosità, si determinano le probabilità di collasso. In base alle osservazioni dello stato della formazione rocciosa e il confronto tra le probabilità di collasso con un valore limite ritenuto ammissibile, è possibile definire se le funzioni di pericolosità calcolate in quei siti siano realistiche o no (Rood et al., 2020).

In Italia non ci sono state le condizioni climatiche e fisiche necessarie per la formazione di questi particolari assetti geologici di età dell'ordine di milioni di anni, ma un approccio simile di test per verficare l'attendibilità delle curve di pericolosità, è stato fatto considerando i speleotemi. La determinazione dei valori di accelerazione e l'età che hanno portato al loro ribaltamento, rendono i speleotemi dei buoni marker paleosismologici (Ferranti et al., 2021, & Pace et al. 2020).

Similmente come con le precarious rocks, dal confronto dei valori di scuotimento del terreno (es. PGA) che portano al ribaltamento dei speleotemi, con i valori di scuotimento atteso al suolo, stimati dal modello di pericolosità, si determina se le analisi di pericolosità siano realistiche o meno.

In questo lavoro di tesi si prendono in considerazione danni (avvenuti o meno) su monumenti greci e romani con strutture semplici. In sintesi, si calcola la probabilità di danno a questi monumenti con i diversi modelli di pericolosità e si verifica se lo stato di danno è confrontabile con le osservazioni, che, si rimarca ulteriormente, sono indipendenti dai modelli di pericolosità che si intende valutare.

Il motivo fondamentale della scelta di questi edifici è che la loro vita può essere maggiore anche di 2000 anni, permettendo una valutazione robusta di un modello di pericolosità sismica stazionario per orizzonti temporali di 50 anni.

1.2.VULNERABILITA' SISMICA

Nota la pericolosità di un sito, ossia la probabilità che in quel luogo avvenga un terremoto con una specifica accelerazione attesa al suolo, attraverso opportune analisi è possibile progettare e mettere in sicurezza gli edifici e difendersi così dal terremoto.

La verifica della messa in sicurezza degli edifici è determinata mediante la valutazione della loro vulnerabilità sismica. Essa rappresenta, la propensione di un edificio a subire un danno, come conseguenza di un terremoto.

La scelta di monumenti semplici per le analisi di validazione è legata alla possibilità di avere curve di fragilità più attendibili.

Nei successivi sottoparagrafi si descrivono alcune tecniche per valutare il meccanismo di collasso per queste strutture (equazioni di rocking) e la rappresentazione della loro vulnerabilità mediante curve di fragilità.

1.2.1. EQUAZIONE DEL ROCKING.

I templi greci e romani presenti nel nostro paese testimoniano la presenza di quelle civiltà vissute nel passato. Seppur abbiano una struttura semplice, essi si sono conservati discretamente bene in un paese ad alta sismicità come l'Italia.

Infatti, le colonne di questi monumenti sono costituite da tamburi (drums) di marmo posti uno sopra l'altro senza malta cementizia. Esse rimangono in piedi solo grazie alla gravità e all'attrito.

Questa configurazione apparentemente sembra fragile, ma studi specifici ingegneristici hanno dimostrato che queste strutture sono in grado di difendersi dai terremoti (Sinopoli 1989; Konstantinidis and Makris 2005).

Quando queste colonne sono sollecitate da sforzi di taglio proveniente da un terremoto, i tamburi che sono liberi di muoversi dissipano l'energia cinetica e forniscono la resistenza alla struttura al ribaltamento.

Dunque, da questa considerazione si può evincere che l'equazione matematica che determina il ribaltamento per questa architettura non è facile da determinare.

La soluzione per ottenere l'equazione del ribaltamento è stata fornita da Housner nel 1963 (Housner, 1963), in cui le colonne sono state modellizzate come un unico blocco rigido di forma parallelepipeda. Questo blocco è libero di muoversi su due punti O e O', detti pivot, ma senza avere la possibilità di rimbalzare ed è poggiato su un suolo rigido indeformabile.

Il blocco ipotizzato dall'autore ha dimensioni di 2b x 2h ed è caratterizzato dai seguenti parametri geometrici: la semi-diagonale R e l'angolo α .

In particolare, la semi-diagonale R è la distanza radiale dal baricentro del blocco ed il centro di rotazione. Essa esprime la dimensione del blocco ed è pari a $R = \sqrt{b^2 + h^2}$.

L'angolo α è formato fra la semi-diagonale e la verticale passante per il punto O, ovvero O', quando il blocco non è in moto ed è pari ad $\alpha = \tan^{-1}(b/h)$. L'angolo α (in radianti) fornisce l'informazione riguardante la forma del blocco, poiché rappresenta la misura della snellezza.

Un esempio del blocco rigido considerato da Housner nel suo lavoro e con le sue caratteristiche geometriche è possibile osservarlo dalla figura 10.



Fig.10: *Esempio di blocco rigido avente dimensioni 2b x 2h, definito secondo i parametri geometrici di Housner e avente un solo grado di libertà.*

Housner ha assunto che gli spostamenti, a seguito dell'azione sismica, sono dovuti prevalentemente a moti rigidi e solo in minima parte alle deformazioni del materiale. Inoltre, ha assunto anche che gli scorrimenti sono esclusi in quanto si fa l'ipotesi che il coefficiente di attrito statico fra il blocco e la base sia sufficiente ad impedirli.

Da queste assunzioni quindi il modello è ad un grado di libertà, nel quale l'unica coordinata lagrangiana è la rotazione θ . Da queste considerazioni è possibile ricavare l'equazione del moto di un blocco di questo tipo, dove il ribaltamento avviene sugli spigoli O-O' per un'accelerazione orizzontale \ddot{u}_g ed essa è ben nota in bibliografia (Yim et al.,1980, Makris et al 2000, Zhang et al. 2001) ed è:

$$I_0\ddot{\theta}(t) + mgR\sin[-\alpha - \theta(t)] = -m\ddot{u}_g(t)R\cos[-\alpha - \theta(t)], \ \theta(t) < 0$$
(8)

$$I_0\ddot{\theta}(t) + mgR\sin[\alpha - \theta(t)] = -m\ddot{u}_g(t)R\cos[\alpha - \theta(t)], \ \theta(t) > 0 \ (9)$$

Dove I_0 rappresenta il momento d'inerzia polare di un blocco rettangolare rispetto ai punti attorno ai quali avviene la rotazione (O e O') ed è uguale a: $I_0 = \frac{4}{3}mR^2$. Le equazioni del rocking 8 e 9, sono valide per ogni valore di α e possono essere espresse in forma compatta diventando:

$$\ddot{\theta}(t) = -p^2 \left\{ \sin[\alpha \, sgn(\theta(t)) - \theta(t)] + \frac{\ddot{u}_g}{g} \cos[\alpha \, sgn(\theta(t)) - \theta(t)] \right\}$$
(10)

Il parametro p, detto anche parametro di frequenza in rad/s, vale per blocchi parallelepipedi omogene ed è definito come:

$$p = \sqrt{\frac{3g}{4R}} \qquad (11)$$

dove g rappresenta l'accelerazione di gravità. Esso rappresenta la frequenza naturale delle vibrazioni libere del blocco sospeso da uno dei suoi spigoli.

Secondo lo studio di Makris et al 2013., è stato dimostrato che l'equazione del rocking numero 10 per un blocco rigido libero è esattamente la stessa per un blocco rigido dotato di un tetto superiore, differendo soltanto leggermente nel parametro di frequenza p. Il cambiamento del parametro di frequenza p dipende dalla massa soprastante e che conferisce maggiore stabilità alla struttura, ma non influisce sul comportamento dinamico del sistema.

Infine, dall'equazione 10 è possibile effettuare due considerazioni. La prima è che è possibile ricavare un'accelerazione di soglia, superato il quale il blocco si mette in moto. Questo valore di soglia è uguale al prodotto tra l'accelerazione di gravità e il moltiplicatore di collasso, che è pari al rapporto tra lo spessore e l'altezza del blocco. Analiticamente questo valore di soglia è rappresentato dall'equazione numero 12 ben nota in letteratura (Makris et al 2000) ed è uguale a:

$$\ddot{u}_s(t) = g \frac{b}{h} = g \tan \alpha \quad (12)$$

La seconda considerazione è che l'equazione 10 non è un'equazione lineare. Essa, infatti, presenta una doppia non linearità dovuta dalla presenza delle funzioni trigonometriche e della presenza della funzione segno.

La funzione segno presente nell'equazione sta a modellizzare il passaggio del punto di rotazione alla base da O ad O' in corrispondenza degli urti alla base. Assumendo che gli urti alla base siano anelastici e che il momento angolare si conservi è possibile quantificare la perdita di energia cinetica alla base mediante la stima del coefficiente di restituzione definito dall'equazione numero 13.

$$r = \left[1 - \frac{3}{2}sin^2\alpha\right]^2 (13)$$

Da come si può osservare dall'equazione 13, il coefficiente di restituzione dipende dalla snellezza. Meno snello è il blocco (maggiore è α), più energia si perde nell'impatto. Ne consegue che la snellezza di un blocco che oscilla è una misura del minimo valore dello smorzamento del sistema.

1.2.2. CURVE DI FRAGILITA'

Uno dei possibili modi per rappresentare graficamente i risultati della risoluzione dell'equazione del rocking, è mediante l'utilizzo delle *curve di fragilità*.

La curva di fragilità è una funzione matematica che esprime la probabilità di superamento di uno stato limite nel comportamento strutturale (ad esempio ribaltamento in questo caso) condizionata sul valore dell'intensità sismica. Il parametro dell'input di scuotimento sismico (I) viene spesso utilizzato per descrivere il livello di intensità sismica.

Analiticamente, la funzione di fragilità rappresenta la probabilità che il sistema strutturale abbia un determinato tipo di danno contemplato. Per danno contemplato si intende la scelta dello stato limite per quella tipologia di struttura. Ossia la scelta della condizione superata la quale, la struttura o uno dei suoi elementi costitutivi non soddisfa più le esigenze per le quali è stata progettata.

Analiticamente lo stato limite (o capacità) viene parametrizzato con un valore, noto come valore di domanda ingegneristica (EDP). Riassumendo, quindi la funzione di fragilità esprime la probabilità condizionata, per uno stato limite contemplato, di superare uno specifico valore di domanda ingegneristica (EDP), rispetto ad un valore di soglia (*edp*), per un dato livello d'input di scuotimento sismico (Kavvadias et al., 2017, Psycharis et al., 2013 e Jalayer & Cornell, 2003).

Analiticamente questa funzione è espressa dall'equazione 14:

$$F_{SL}(I) = P(EDP \ge edp|I) \quad (14)$$

Esempi di parametri di domanda ingegneristica, utilizzati per questo tipo di architettura sono: la massima rotazione θ_{max} e il massimo spostamento orizzontale $max[u_{top}]$ e si determinano mediante analisi dinamiche lineari e analisi dinamiche non lineari.

In questo lavoro di tesi, per la tipologia dei monumenti scelti è stato scelto come stato limite, quello di danno ed è rappresentato dal ribaltamento della colonna.

Dal tipo di parametro EDP che si utilizza, si ricava il relativo coefficiente di performance *edp*, associato allo stato limite contemplato. Questi coefficienti si ricavano mediante un approccio prestazionale. Ossia ogni struttura viene progettata al raggiungimento di uno specifico stato limite, e quindi questi coefficienti esprimono la soglia di performance. Il superamento di questo valore di performance determina così la fragilità strutturale.

Nella determinazione della curva di fragilità si assumono che i valori di intensità sismica che marcano la soglia di superamento dello stato limite, ovvero i valori della capacità strutturale espressi in termini di (I), sono descritti da una distribuzione di probabilità log-normale. Scegliendo per esempio come input sismico (I) la PGA, allora è possibile calcolare analiticamente la funzione di fragilità, $F_{SL}(PGA)$, calcolando la media e la deviazione standard dei logaritmi di PGA capacità, espressi rispettivamente come μ_{PGAcap} e σ_{PGAcap} , con la seguente equazione (15):

$$F_{SL}(PGA) = P(SL|PGA) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(PGA) - \mu_{PGAcap}}{\sigma_{\ln PGAcap}}\right)$$
(15)

Dove per Φ si indica la funzione cumulativa della distribuzione normale standardizzata.

Tuttavia, all'aumentare del parametro dell'intensità sismica non tutti i valori causano il ribaltamento della colonna. Quindi, dalla nostra analisi bisogna distinguere per quali valori di PGA avviene l'overturning (ribaltamento) e quale no. Questa distinzione è molto importante perché altrimenti non è possibile calcolare i valori di μ_{PGAcap} e σ_{PGAcap} .

La valutazione della curva di fragilità è frutto d'incertezza. Incertezza legata alla conoscenza parziale del comportamento strutturale in risposta allo scuotimento sismico.

Considerando un monumento con specifiche caratteristiche geometriche, è possibile osservare diverse curve di fragilità in funzione del tipo di suolo su cui esso poggia. Questo perché da un suolo di tipo A (Roccia-Velocità delle onde di taglio 800 m/s) fino a quello di tipo E (Terreni scarsamente addensati-Velocità onde di taglio comprese tra i 100 e 180 m/s), vi sono gli effetti d'amplificazione di sito. In particolare, si ottengono delle alterazioni delle basse frequenze per i suoli più scadenti, che comportano grandi lunghezze d'onda per il moto al suolo ed influenzano sulla stabilità della struttura.

Un esempio di diverse curve fragilità prodotte per diversi tipi di suolo (Da suolo A fino a suolo E) per uno stesso monumento avente un'altezza (H) di 9 metri, numero di Drum/ (D) 9 e Snellezza (S) 8, viene rappresentata dalla figura 11.



Fig.11: Curva di fragilità per un monumento avente un'altezza (H) di 9 metri, numero di Drum (D) 9 e Snellezza (S) 8. I diversi colori rappresentano le diverse curve di fragilità per queste strutture per diversi tipi di suoli (Da suolo A suolo E). (Figura è tratta dal lavoro di Pappas et al. 2013).

1.3. RISCHIO SISMICO

Nell'ambito dei pericoli naturali il rischio è definito come la probabilità che un dato evento possa causare danni all'uomo, ambiente ed oggetti in un determinato periodo di tempo.

Nel caso di questo lavoro di tesi, avendo identificato come sorgente di Hazard il fenomeno sismogenetico, il rischio che viene calcolato è il rischio sismico.

Scegliendo come livello di danno il ribaltamento (Overturning/OT) delle colonne, l'equazione utilizzata per il calcolo del rischio sismico per un generico parametro di moto al suolo (IM) è espressa dalla relazione ottenuta dalla letteratura di Kennedy (2011) e McGuire (2004). Dove il rischio sismico è definito dall'integrale di convoluzione delle funzioni di probabilità di Hazard e di Vulnerabilità.

$$\lambda_{OT} = \int_{\Omega_{IM}} \lambda(im) \, dP(OT|IM = im) \tag{16}$$

Dove:

- λ_{OT} rappresenta il numero di perdite atteso per una particolare tipologia di struttura.
- $\lambda(im)$ è la curva di Hazard fornita dal modello di pericolosità considerato, ed è la frequenza di occorrenza del moto del suolo (*im*).
- P(OT|IM = im) è la curva di fragilità [P(OT|I)], rappresentante la vulnerabilità della struttura. Ossia è la probabilità condizionata che dato il parametro sismico (IM), la struttura si ribalta ("overturning", OT).

Nell'equazione 16 si nota che si considera l'incremento della curva di fragilità. Normalmente si tende a derivare la curva di fragilità e non quella di Hazard, poiché la pericolosità è calcolata solo per un numero limitato di valori di movimenti del suolo e quindi la sua derivata potrebbe risultare meno accurata (Douglas et al 2013).

Una volta definito il taso medio annuo di ribaltamento per queste strutture, mediante la relazione matematica precedente, è possibile calcolare la loro probabilità di ribaltamento in un tempo T, corrispondente all'età di costruzione dei monumenti, utilizzando il modello di Poisson, coerentemente con il modello di pericolosità adottato.

$$P(C|\lambda_{OT},T) = 1 - e^{(1 - \lambda_{OT}T)}$$
(17)

Un altro metodo utilizzato in questo lavoro di tesi, per calcolare il rischio sismico e la relativa probabilità di superamento dello stato limite, evitando di effettuare l'integrale di convoluzione delle due curve di fragilità e pericolosità, è dato dall'applicazione del metodo semplificato "Probability Based Demand and Capacity Factor" brevemente definito come "DCFD".

Il metodo DCFD deriva da un approccio prestazionale: ossia, come già espresso precedentemente, ogni struttura viene progettata in base al raggiungimento di un prefissato stato limite (Jalayer et al 2020).

Da questa metodologia si ricava una formula chiusa ed è ottenuta assumendo che:

- 1) Il superamento di uno stato limite è espresso da un processo di Poisson.
- 2) Le curve di pericolosità in scala logaritmica hanno un andamento approssimabile ad una legge di Potenza.
- L'input sismico corrispondente alla soglia di superamento dello stato limite per uno specifico livello di prestazione della struttura (ovvero la capacità espressa in termini del parametro di intensità sismica I) ed è espresso con una distribuzione log-normale avente una mediana η ed una deviazione standard β.

Da queste assunzioni il calcolo del rischio sismico che si ottiene è in termini del tasso medio annuo di superamento di uno stato limite (qui, ribaltamento) λ_{OT} .

Il tasso λ_{OT} si ricava da un'equazione in forma chiusa ed è definita dalla relazione 18 come:

$$\lambda_{OT} = \lambda_{(\eta_{IM,OT})} \cdot e^{\left(0.5 \cdot k^2 \cdot \beta_{IM,OT}^2\right)} \quad (18)$$

Dove per $\eta_{IM,OT}$ e $\beta_{IM,OT}$ si intendono i parametri di mediana e deviazione standard della curva di fragilità.

Invece il parametro $\lambda_{(\eta_{IM,OT})}$ rappresenta la frequenza di superamento, valutata considerando la curva di Hazard, riferito al valore della mediana della curva di fragilità (ovvero PGA capace).

Mentre il parametro k rappresenta il coefficiente di forma della curva di pericolosità. Assumendo che essa in scala logaritmica ha un andamento lineare, la stima del parametro k è data dal calcolo della sua pendenza.

La stima dei parametri $\lambda_{(\eta_{PGA,OT})}$ e *k* avviene mediante un approccio grafico e considerando in contemporanea sia la curva di fragilità e sia la curva di Hazard.

Quindi data una curva di fragilità espressa nella sua formula cumulata (CDF), si stima la sua mediana (PGA capace) considerando il 50% percentile $\eta_{IM,OT}$. Dopo di che, considerando la curva di pericolosità sismica si vede questo valore a quale tasso di frequenza di superamento corrisponde, ottenendo così il parametro $\lambda_{(\eta_{IM},OT)}$.

Dal valore di η_{IM} sulla curva di Hazard in scala logaritmica si considerano due punti equidistanti nella vicinanza di η_{IM} . Da questi è possibile stimare la pendenza tangente k della funzione di Hazard nel punto η_{IM} , in scala logaritmica, applicando l'equazione numero 19:

$$k = \frac{\ln\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)}{\ln\left(\frac{Pga_2}{Pga_1}\right)} \qquad (19)$$

Una volta determinato il tasso medio annuo di ribaltamento (OT) con entrambi metodi, i risultati ottenuti dovranno essere inferiori ad un valore limite ritenuto ammissibile λ_0 espresso dalla diseguaglianza 20, per indicare come accettabile il livello di rischio di ribaltamento:

$$\lambda_{OT} \leq \lambda_0$$
 (20)

Pertanto, i risultati ottenuti dal confronto del parametro λ_{OT} rispetto ad un valore soglia e i dati effettivamente osservati in termini di ribaltamento o la mancanza di ribaltamento, permetteranno di verificare se eventuali danni o meno dei monumenti storici, sono compatibili con il modello di pericolosità. Da questo confronto, quindi è possibile verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti, i quali successivamente sono stati poi utilizzati per la verifica dell'attendibilità dei modelli di pericolosità.

CAPITOLO 2 CREAZIONE DEL DATASET

In questo capitolo viene descritto lo sviluppo di questa nuova metodologia di test di attendibilità dei modelli di pericolosità MPS04, SHARE e MPS19 e i criteri di campionamento dei monumenti, utilizzati come dati indipendenti durante la valiutazione dei modelli.

Successivamente sempre all'interno del paragrafo, segue una breve descrizione degli stessi considerando: le caratteristiche architettoniche, lo stato di conservazione, eventuale tipo di danno da terremoto mediante evidenze archeo sismologiche descritti dai lavori di bibliografia e informazioni sulla sismicità storica dei siti ottenute consultando il catalogo storico CPTI15 dal sito internet (<u>https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/</u>).

2.1. SVILUPPO METODOLOGIA TEST ATTENDIBILITA' MODELLI DI PERICOLOSITA' E CREAZIONE DEL DATASET

Dalle metodologie di test dei modelli di pericolosità effettuati con dati indipendenti descritti nel capitolo precedente, in questo progetto di tesi è stato sviluppato una nuova metodologia di verifica dei modelli di pericolosità MPS04, SHARE e MPS19. Questa è avvenuta considerando come dati indipendenti i monumenti avente una struttura semplice, presenti sul territorio nazionale italiano, e che coprono un'ampia finestra temporale Infatti, l'Italia è dotata di un ricco patrimonio culturale riconosciuto in tutto il mondo e lo stile dei monumenti che rispecchiano le caratteristiche scelte, per questo lavoro di tesi, sono di origine greca e romana (età circa 2500 anni). La scelta di queste due popolazioni antiche è avvalorata dal fatto che hanno lasciato testimonianza del loro insediamento in quasi tutte le regioni del nostro paese. In particolar modo, tra le loro costruzioni avente un'architettura semplice sono stati scelti colonnati (file di colonne) e/o templi.

Nel capitolo precedente, è stato visto come questa tipologia di strutture sono in grado di resistere ai terremoti e pertanto, esse risultano essere le prime strutture antisismiche della storia.

I valori di moto al suolo che portano al collasso di questi monumenti, come le *precarious rocks e gli speleotemi*, forniscono dei vincoli che possono essere utilizzati per validare le stime di pericolosità effettuate sul territorio italiano.

Una volta stimato il rischio sismico per questa tipologia di strutture, in base ad un valore limite ritenuto ammissibile e dalla conoscenza di eventuali danni da terremoto, è possibile verificare se le curve di pericolosità fornite dal modello sono attendibili o no, assumendo che le curve di fragilità utilizzate siano giuste.

In questo lavoro di tesi, sono stati considerati 14 monumenti. L'idea di base è stata quella di voler cercare di coprire il territorio nazionale in maniera omogenea. Questo principio fornisce una stima seppur limitata nella quantità ma rappresentativa della quasi totalità del territorio della penisola italiana.

Un'altra considerazione che è stata fatta durante il campionamento è che le colonne utilizzate devono essere strutture isolate. Nel senso che con il passare degli anni, queste strutture semplici fungevano come base da costruzione per strutture architettoniche più complicate, e quindi non più idonee per effettuare le stime di attendibilità dei modelli di pericolosità. Vedasi per esempio il Pantheon, divenuta una basilica di stile adrianea o anche il duomo di Siracusa fondata su un antico tempo dorico greco.

Ogni monumento scelto sul territorio nazionale è indicato con un cerchio colorato e la loro distribuzione è mostrata dalla figura numero 12.



Fig.12: Mappa del territorio italiano, in rosso sono rappresentati i siti dove sono localizzati i monumenti d'epoca romana, in arancione quelli di epoca greca.

La differenziazione dei colori dei cerchi permette di distinguere l'appartenenza dei monumenti. In particolare, in arancione sono raffigurati i monumenti di origine greca. Dalla loro distribuzione nel sud dell'Italia, si può ricostruire fin dove arrivava il vecchio impero ellenico nel nostro paese e che si sono conservate più strutture nella regione Sicilia.

In rosso invece, sono i monumenti di origine romana conservati in buone condizioni e non riutilizzati per costruzioni più complesse.

La distribuzione dei 14 monumenti scelti non coprono zone di alta pericolosità lungo la fascia appenninica, perché non sono stati trovati monumenti che rispettavano i criteri di scelta esposti precedentemente. Seppur può essere un limite di dati in un'area molto importante nel nostro paese, la loro assenza non ha influito sullo sviluppo di questa metodologia di test e sui risultati finali.

Di seguito viene effettuata una descrizione delle caratteristiche architettoniche dei monumenti, evidenze di danno da terremoto e una caratterizzazione della sismicità dei siti attraverso la consultazione del catalogo storico CPTI15.

TEMPIO DI NETTUNO-AGROPOLI (CAMPANIA)

Il Tempio di Nettuno (o Tempio di Poseidone) è situato nel parco archeologico di Paestum (Posedonia), antica città della Magna Grecia. Il parco archeologico è situato in Campania, ed il monumento è del V secolo a.C. Il tempio, situato in una zona con intensità macrosismiche massime osservate pari a I=IV, è in buone condizioni e non si evincono evidenze di danni da terremoto (Fig. 13).



Fig.13: Tempio di Nettuno- (Paestum (SA)- Campania).

Come si osserva dalla figura 13 il monumento è caratterizzato da un'architettura quadrangolare, caratterizzato da un perimetro di 6x14 colonne, che si eleva su un creptodoma (piattaforma di tre gradini) ed è dotato di trabeazione (parte sommitale della colonna) che forniscono maggiore stabilità alla struttura (Makris et al 2013).

Soffermandosi sulle colonne, che sono gli elementi utilizzati per la stima del collasso, esse sono di stile dorico e sono alte 8.88 m con un diametro alla base di 2 m.
TEMPIO DELLA CONCORDIA-VALLE DEI TEMPLI (SICILIA)

Il tempio della Concordia è un altro tempio greco di stile dorico, costruito intorno al V secolo a.C. ed insieme al Partenone è considerato il tempio dorico meglio conservato al mondo (Barone et al 2007).

Esso è situato all'interno dell'area archeologica della Valle dei Templi, costituente l'antica città di Agrigento.



Fig.14: *Tempio della Concordia situato nel parco archeologico della Valle dei Templi, in Agrigento (Sicilia).*

L'antico luogo di culto è situato in una zona caratterizzato da osservazioni storiche con bassi valori di intensità macrosismica osservata, come per il tempio di Paestum, e non si riscontrano danni da terremoto.

L'architettura è simile al tempio campano, costituito da una peristasi quadrangolare di 6x13 colonne. Esse si ergono su un creptodoma di quattro gradini ed è fornito della trabeazione. Le colonne sono alte 6,67 metri e avente un diametro alla base di 1,11 metri.

TEMPIO C - SELINUNTE- (SICILIA)

Il tempio C di Selinunte è situato nell'antica città di Selinus, oggi parco Archeologico, nella Sicilia sud-occidentale, nel comune di Castelvetrano (provincia di Trapani).

L'antica città ha subito notevoli danni a causa di eventi bellici tra i Romani e i Cartaginesi.

Ma con i primi scavi archeologici la particolare conformazione dei tamburi delle colonne (fig.15) ha suggerito agli studiosi che questo monumento non sia crollato per via delle guerre tra le due popolazioni.



Fig. 15: *Disposizione dei tamburi ad effetto domino, figura tratta dal lavoro di (Guidoboni et al 2002).*

Da questo particolare tipo di assetto, le ricerche archeologiche sono state approfondite fino a ricostruire che il terremoto che ha causato la distruzione di questo tempio è avvenuto intorno al 400 d.C. (Guidoboni et al, 2002). Recentemente questo monumento è stato ricostruito, ed era formato da un peristilio di 6x17 colonne (alte 8.62 m e con un diametro alla base di 1.43). Ad oggi sono state risollevate soltanto 14 colonne e una parte della trabeazione.

La ricostruzione parziale del tempio dorico è mostrata dalla figura 16.



Fig.16: *Tempio C di Selinunte in Sicilia, ricostruito parzialmente dopo il terremoto del* 400 *a.C.*

TEMPIO DI HERA LACINIA- CROTONE (CALABRIA)

Questo monumento sorge sul promontorio Capo Colonna. Questo tempio è di stile dorico, costruito intorno al VI secolo a.C. Al di là della funzione religiosa, la sua presenza fungeva da punto di riferimento per la navigazione e per la definizione dei confini.

Il tempio purtroppo è stato saccheggiato e usato come cava da costruzione. Prima del terremoto del 9 giugno del 1638 di Magnitudo momento (Mw) 6.7, esso era costituito da due colonne (alte 8 m) (Galli,2006). Dopo l'evento tellurico ne è rimasta soltanto una, la quale costituisce l'unico resto del tempio all'interno del parco Archeologico (fig.17)



Fig.17: Ultima colonna dorica greca del Tempio di Hera Lacinia, situata a Capo-Colonna (Crotone-Calabria).

TEMPIO DI POSEIDONE – TARANTO (PUGLIA)

Il Tempio di Poseidone, è un monumento greco di ordine dorico costruito intorno al VI secolo a.C. Anche questo come quello di Crotone, è stato fortemente saccheggiato per utilizzare la loro pietra come materiale da costruzione. A causa di questi interventi umani, è stato difficile poter ricostruire con precisione la peristasi del tempio.

Gli studi effettuati sui resti ad oggi rinvenuti non hanno riscontrato danneggiamenti da terremoto. Infatti, rispetto ad altre strutture il monumento abbia resistito all'evento del 1743 di Magnitudo momento 6.9, mentre ha causato ingenti danni ad abitazioni e chiese (CFTI5MED).

Ad oggi sono rimaste soltanto due colonne, mostrate nel centro storico di Taranto, alte 8 metri avente un diametro di 1,41 m e la sua conformazione attuale è raffigurata dalla figura 18.



Fig.18: Tempio di Poseidone, situato a Taranto (Puglia).

TEMPIO DI SEGESTA- CALATIFIMI SEGESTA-(SICILIA)

Il tempio di Segesta è un tempio Dorico, situato nella provincia di Calatifimi Segesta. Nonostante l'antica città greca sia stata in guerra con la città di Selinunte, per motivi territoriali, il monumento ad oggi è in ottime condizioni.

Dagli studi archeologici è possibile osservare che esso, nonostante il terremoto del Belice del 1968 di Magnitudo 6.5, non abbia subito danni da terremoto. L'architettura del tempio, rappresentata dalla figura 19, è costituita da una peristasi di 6x14 colonne, alte 9 metri e aventi un diametro alla base di 1.5 metri, costruite su uno stilobate costituito di 4 gradini ed è dotato della parte superiore costituita dalla trabeazione e frontone



Fig.19: Tempio di Segesta, provincia di Calatafimi Segesta (Sicilia).

TEMPIO DI APOLLO ORTIGIA-SIRACUSA (SICILIA)

Il tempio di Apollo Ortigia è un monumento di stile dorico che si trova nell'isola di Ortigia a Siracusa in Sicilia, fondato nel VI secolo a.C.

Il monumento è situato in una zona ad alta intensità sismica (I10), dove per gli eventi del 1125 di Magnitudo 5.8 e quello del 1693 di Magnitudo 7.4 costruzioni civili e storiche sono state danneggiate. Come per esempio il duomo, contenente al suo interno il vecchio tempio dorico greco di Minerva.

Il materiale litoide che costituiva il tempio era stato utilizzato per altre costruzioni post ellenica. Ad oggi del vecchio tempio, caratterizzato da un colonnato di 6x17 colonne alte 6,62 m e di un diametro alla base di 1,32 metri, sono rimaste soltanto due colonne e un pezzo della trabeazione superiore che ha una forma ad "L" (Fig.20).



Fig.20: Tempio di Apollo Ortigia, Siracusa (Sicilia).

TEMPIO DI HERA O TAVOLE PALATINE-METAPONTO (BASILICATA)

Le Tavole Palatine sono i resti di un vecchio tempio greco di stile dorico dedicato ad Hera. Esso è situato in Basilicata a Metaponto, ed è famosa per aver ospitato il filosofo Pitagora.

Dal catalogo storico, la zona di Metaponto è caratterizzata da sismicità avente intensità I4 e I6, e sul monumento non si presentano fratture dovuti da fenomeni sismici. In origine l'antico tempio di Hera era caratterizzato da una peristasi di 6x12 colonne. Ad oggi si sono conservate soltanto 15, di cui 10 sono sul lato settentrionale e 5 sul meridionale e dotate ad entrambi i lati della trabeazione.

La sua attuale conformazione è possibile osservarla dalla figura 21.



Fig.21: Tavole Palatine o Tempio di Hera- Metaponto (Basilicata).

PORTICATO-AREA ARCHEOLOGICA "LA CUMA" -MONTE RINALDO (MARCHE)

Il porticato dell'area Archeologica La Cuma, è il monumento più "recente" del dataset. Anche se l'età della struttura è del II secolo a.C., la scoperta di questo porticato è recente e l'istituzione dell'area archeologica è avvenuta nel 1960.

L'area archeologica è caratterizzata da osservazioni di intensità macrosismica I=VI-VII, e non si sono osservate evidenze di danno da terremoto.

Il porticato è costituito da due file di colonne di stile diverso (fig.22), quello dorico (situato nella parte esterna) e quello ionico (situato nella parte interna).

Le colonne avente uno stile dorico, sono alte 4,75 metri con diametro alla base di 0,80 metri, mentre quelle di ordine ionico sono alte 6.8 metri ed aventi un diametro alla base di 0,97 metri.



Fig.22: Area archeologica la Cuma- Monte Rinaldo (Marche).

COLONNE SAN LORENZO- MILANO

Le colonne di San Lorenzo rappresentano i resti dell'antica città di Mediolanum, divenuta prima colonia romana nel 89 a.C. (fig.23).



Fig.23: Colonne San Lorenzo (Milano-Lombardia).

Milano è caratterizzata da eventi storici con bassa intensità macrosismica (I=IV-VI). Le colonne di stile corinzio oggi sono in ottime condizioni. Esse sono alte 7,5 metri e avente un diametro di 0,93 che reggono una trabeazione che conferisce maggiore stabilità alla struttura.

CAPITOLIUM BRESCIA (LOMBARDIA)

Il *Capitolium* era il tempio principale di ogni città romana ed era il simbolo stesso della cultura di Roma. Situato a Brescia, insieme al teatro e agli altri scavi nell'area archeologica, questo sito è il più importante complesso di rovine e resti di edifici pubblici d'età romana presenti nell' Italia Settentrionale (fig.24).



Fig.24: Capitolium Romano-(Brescia-Lombardia).

Costruito intorno al I secolo d.C., esso ha subito danni nel IV secolo da un incendio e probabilmente anche da un terremoto nel V secolo insieme al teatro adiacente.

Brescia è caratterizzata da diverse intensità macrosismiche osservate storicamente pari a I=V-VI, ma si sono registrati anche eventi di intensità I=VIII, derivato dall'evento Bresciano del 1222.

Ad oggi del vecchio tempio sono rimaste soltanto 8 colonne, di stile corinzio alte 9,5 m e avente un diametro di 1,12 m.

Sopra le colonne poggia una parte della trabeazione, ben decorata e dal quale si è rinvenuta un'incisione latina che attestava la proprietà del tempio all'imperatore Vespasiano.

BASILICA SEPINO (MOLISE)

La Basilica romana di Sepino era un luogo in cui si svolgevano funzioni pubbliche ed in comune con il foro.

Esso situato nell'area archeologica di Altilia, in Molise, è stato costruito intorno al II secolo a.C.

La basilica presenta una pianta rettangolare di m. 31,60 x 20,40 suddivisa internamente da un peristilio di venti colonne a fusto liscio, quattro sui lati brevi ed otto sui lati lunghi, sormontati da capitelli di stile ionico.

La struttura insieme ad altre costruzioni dell'area archeologica è stata danneggiata dal sisma del 346 d.C. avente come magnitudo 7 (Galadini et al., 2004).

Grazie agli scavi del 1950 ne sono state ricostruite soltanto 9 (altezza 6.15 m e diametro di 1,02 m) e sono rappresentate dalla figura 25.



Fig.25: Colonne di stile ionico della Basilica romana di Sepino (Molise).

FORO ROMANO VELLEIA (EMILIA ROMAGNA)

Il foro romano di Velleia è situato nell'area archeologica dell'Antiquarium, in provincia di Piacenza. Le sue origini risalgono al I secolo a.C. diventando una colonia romana nel 89 a.C.

A Velleia venivano svolte attività giuridiche e grazie alle numerose terme, era meta di villeggiatura per nobili e ricchi romani.

Nell'antica città si sono osservati eventi con basse intensità macrosismiche, I=V, e quindi non presenta lesioni o danni da terremoti.

La città ha vissuto periodo di crisi, dovuto a fenomeni franosi che ha danneggiato la città. A causa di questo fenomeno geologico, la città fu abbandonata intorno al V secolo, per poi essere riscoperta con i lavori archeologici del 1747.

Ad oggi sono stati rialzate alcune colonne del foro di stile dorico e sono alte 4.56 metri avente un diametro di base di 0.91 metri (Fig. 26).



Fig.26: Foro romano dell'Antiquarium di Velleia. (Piacenza, Emilia-Romagna).

FORO ROMANO AQUILEIA (FRIULI VENEZIA GIULIA)

La città di Aquileia, risale al I secolo a.C. ed è stata una città militare di frontiera.

Qui spesso, soggiornava Gaio Giulio Cesare per le pianificazioni di campagne militari alla conquista dei territori delle popolazioni celtiche.

Il foro era lungo 115 metri in lunghezza e 57 in larghezza, caratterizzato da colonne alte di stile corinzio (fig.27).



Fig.27: Foro romano di Aquileia- (Friuli-Venezia Giulia).

Come si può notare dalla figura, dagli scavi del 1930 ad oggi sono state ricostruite soltanto 14 colonne di stile corinzie alte 5 m ed avente un diametro di 0,62 metri.

Essendo l'antica città ubicata in zone dove l'intensità macrosismica osservata storicamente è medio bassa (I=III-IV), ad oggi non si sono rilevati danni da terremoto.

CAPITOLO 3

CALCOLO DEL RISCHIO SISMICO

In questo capitolo verranno descritte le fasi che hanno portato al calcolo delle probabilità di ribaltamento per i monumenti scelti, costituendone il dataset.

3.1. IDENTIFICAZIONE DELLA CLASSE DI SUOLO

Una volta scelte le strutture di origine greca e/o romana per le quali si vuole determinare le probabilità di ribaltamento, è stato fatto uno studio d'identificazione della classe di suolo su cui esse poggiano. Conoscere la tipologia di suolo è importante, poiché tramite quest'informazione si tiene conto degli effetti di amplificazione di sito.

La classificazione della tipologia dei terreni è stata fatta tenendo in considerazione l'attuale normativa sismica (NTC18) che si basa sul calcolo della Vs-Equivalente ($V_{S,eq}$). Questo parametro si basa sui valori della velocità di propagazione nel sottosuolo delle onde di taglio (Onde S). Questa velocità viene stimata mediante opportune metodologie geofisiche attive in sito o in pozzo (es: MASW e Down-Hole).

Noti i valori di propagazione della velocità delle onde S, V_S , e la stratigrafia del sottosuolo di ogni sito, la classificazione del tipo di terreno attraverso la Vs equivalente è espressa mediante la seguente relazione (21):

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^{N} \frac{h_i}{V_{S,i}}} \quad (21)$$

con:

- *h_i*=spessore dell'i-esimo strato;
- $V_{S,i}$ =velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;
- N=numero di strati;
- H= profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_S non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{S,eq}$ è definita dal parametro $V_{S,30}$,

ottenuto ponendo H=30 m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

In base ai valori della Vs equivalente si distinguono 5 classi di sottosuolo che sono riportate nella figura 28.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde
A	di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteri-
	stiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consi-
В	stenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da
	valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consi-
C	stenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento del-
C	le proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra
	180 m/s e 360 m/s.
	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consi-
D	stenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento del-
D	le proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra
	100 e 180 m/s.
Б	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le catego-
E	rie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Fig.28: Classificazione dei suoli mediante il calcolo del Vs-Equivalente (NTC 2018).

L'identificazione della classe di suolo, su cui poggiano i monumenti, è stata fatta considerando:

- 1. Ricerca di relazioni di microzonazione sismica dell'area.
- 2. Classificazione sismica del sito d'ubicazione delle stazioni sismiche vicine al sito d'interesse, mediante prove geofisiche (Database Itaca).
- 3. Lavori di bibliografia.

In assenza di relazioni di microzonazione sismica dell'area, dove si stima il Vs equivalente, o di lavori di bibliografia, l'identificazione della classe di terreno è avvenuta in maniera indiretta come nel caso 2.

Conoscendo adesso per ogni monumento la rispettiva classe di suolo, è stata creata una tabella (Tab.1) in cui è possibile riassumere le caratteristiche geometriche e geologiche per ogni monumento.

Monumenti	Base (m)	Altezza(m)	Raggio (m)	Semialtezza (m)	Classe di suolo
Tempio Nettuno (Paestum- Campania)	2	8.88	1	4.44	C (Database Itaca)
Tempio Concordia- (Agrigento-Sicilia)	1.11	6.67	0.555	3.335	C (Database Itaca)
Tempio C- (Selinunte-Sicilia)	1.43	8.62	0.715	4.31	C (Bottari et al.,2002)
Tempio di Hera Lacinia (Capo Colonna-Crotone)	1.39	8.35	0.695	4.175	C- microzonazione sismica
Tempio Poseidone- (Taranto-Puglia)	1.41	8.47	0.705	4.235	B- microzonazione sismica
Tempio di Hera (Metaponto- Basilicata)	1	6	0.5	3	B- (Database Itaca)
Tempio Segesta- (Calatifimi- Sicilia)	1.5	9	0.75	4.5	A- (Database Itaca)
Tempio Apollo- Ortigia (Siracusa- Sicilia)	1.32	6.62	0.66	3.31	A- (Panzera et al. 2013)
Porticato Romano (La Cuma- Marche)	0.97	6.8	0.485	3.4	B- (Databases Itaca)
Colonne San Lorenzo-(Milano- Lombardia)	0.87	7.3	0.435	3.65	C- (Database Itaca)
Capitolium Romano-(Brescia- Lombardia)	1.18	9.5	0.59	4.75	C- (Database Itaca)
Basilica Romana (Sepino-Molise)	0.87	6.15	0.435	3.075	B- microzonazione sismica
Foro Romano (Velleia)	0.91	4.56	0.455	2.28	C- (Database Itaca)
Foro Romano- (Aquileia)	0.62	5	0.31	2.5	C- microzonazione sismica

Tab.1: Tabella riepilogativa delle caratteristiche geometriche e geologiche dei monumenti.

Dopo aver identificato per ogni monumento la tipologia di suolo sono stati calcolati gli effetti di amplificazione di sito, attraverso l'approccio semplificativo di normativa, considerando la seguente relazione (22):

$$Pga max = Pga \cdot S$$
 (22)

Dove il parametro S indica il coefficiente di amplificazione ed è definito come il prodotto tra l'amplificazione stratigrafica (SS) per l'amplificazione topografica (ST)-(eq.23):

 $S = SS \cdot ST$ (23)

Essendo i monumenti localizzati su una superficie topografica pianeggiante il suo valore è uguale ad 1, quindi solo in questo caso l'amplificazione dipende soltanto dal tipo di sottosuolo (S = SS).

I valori del coefficiente di amplificazione stratigrafica sono forniti sempre dalla normativa sismica ed essi variano per ogni classe di suolo (fig.29).

Categoria sottosuolo	S _S
Α	1,00
В	$1,00 \le 1,40 - 0,40 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \le 1,20$
С	$1,00 \le 1,70 - 0,60 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \le 1,50$
D	$0,90 \le 2,40 - 1,50 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \le 1,80$
E	$1,00 \le 2,00 - 1,10 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \le 1,60$

Fig.29: Espressioni per il coefficiente di amplificazione stratigrafica.

Dalla figura 29, si osserva che la categoria di suolo A provoca amplificazioni minime, tanto da non contribuire ad aumentare i valori di PGA. Mentre, le categorie di suolo B, C, D ed E tendono ad aumentare i valori d'accelerazione massima attesa al suolo di un fattore d'amplificazione, ottenuto calcolando il valore medio dei coefficienti esterni delle relative espressioni mostrati in figura 29.

3.2. CURVE DI PERICOLOSITA'

Successivamente alla caratterizzazione della tipologia di suolo di fondazione dei monumenti, si è passati alla determinazione delle curve di pericolosità rappresentative per queste architetture storiche.

La loro determinazione permette di conoscere quali sono le accelerazioni attese al suolo, considerando tutti i possibili scenari.

Sia per quanto riguarda il modello di pericolosità italiano (MPS04) e sia quello europeo SHARE, l'accesso ai dati è avvenuto mediante un sistema webGis, Mentre per quanto riguarda i dati di pericolosità relativa a MPS19, il modello non dispone ancora di una piattaforma WebGis per accedere alla libreria dati. Quindi essi sono stati forniti dal mio tutor, il prof. Warner Marzocchi, membro del gruppo di ricerca per la realizzazione del nuovo modello di pericolosità.

Nei paragrafi che ne seguiranno verranno descritte le modalità d'accesso alle rispettive librerie dati di pericolosità dei modelli di pericolosità considerati.

MPS04

Il modello di pericolosità italiano MPS04 è attualmente in uso nella progettazione e messa in sicurezza degli edifici.

Nonostante sia stato pubblicato nel 2004, la sua interfaccia grafica è moderna e di facile utilizzo.

Accedendo al sito web (<u>http://essel.mi.ingv.it/</u>), la piattaforma webGis è costituita da una mappa della penisola italiana vuota e da strumenti di selezione. Da uno di questi è possibile graficare i valori di scuotimento del terreno, per una specifica soglia di probabilità di eccedenza in 50 anni, su tutto il territorio nazionale.

In questo lavoro di tesi è stato scelto come parametro di scuotimento la PGA e la soglia di probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni.

La distribuzione sul territorio nazionale della PGA per il 10% di eccedenza in 50 anni è riportata nella figura 30.

Modello di pericolosità sismica MPS04-S1 . **II**. T 2 lizza punti della griglia riferiti a: . Parametro dello PGA 🗸 tà in 50 anni: 10% 🗸 Percentile: 50° 🗸 riodo spettrale (sec.): idisegna mappa 📀 41.5 Long.: 12.883 Ricerca Com .500 0.900 1.000 250 .750-2.000 ۲ (00) 36 72 10814418

Fig.30: Mappa interattiva della pericolosità italiana (MPS04)

ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

I diversi colori di PGA indicano i diversi valori di accelerazioni al suolo. In particolare, si osservano quantità più alte nell'area alpina nord-orientale e lungo l'Appenino centro-meridionale.

La rappresentazione dei valori di accelerazione è definita in celle (quasi) quadrate disposte lungo tutto il territorio secondo una griglia avente un passo di 0.05 gradi.

Nella sezione "navigazione", inserendo il comune d'appartenenza del sito archeologico e in particolare le coordinate di Latitudine e Longitudine di ubicazione del monumento è possibile risalire al nodo specifico della griglia. Una volta trovato e selezionato il punto della griglia del sito archeologico è stato possibile accedere alla libreria dei dati di pericolosità. Dalla libreria dati è stato possibile scaricare i valori di **PGA-** λ (frequenza annuale di superamento) che definiscono la curva di pericolosità del sito calcolata su un suolo rigido di tipo A.

Un esempio di ricerca e visualizzazione del nodo della griglia è stato fatto per il monumento di Siracusa (Tempio di Apollo-Ortigia) ed è rappresentato dalla figura 31.



Fig.31: Esempio del nodo della griglia per il modello di pericolosità MPS04 specifico per il monumento del tempio di Apollo Ortigia in Siracusa.

Qualora invece la posizione del monumento non coincidesse nel punto della griglia, è stato scelto il nodo più vicino, come nel caso per il tempio di C di Selinunte (fig.32).



Fig.32: Esempio del nodo non coincidente con la posizione del Tempio C di Selinunte per il modello di pericolosità MPS04. In rosso si evidenzia il punto della griglia utilizzato per scaricare i dati di pericolosità.

SHARE

Il modello di pericolosità SHARE è stato rilasciato nel 2016 e l'accesso e il download dei dati di pericolosità, anche per questo modello è di facile utilizzo.

Accedendo alla pagina web (<u>http://www.efehr.org/en/hazard-data-access/hazard-curves/</u>) si entra nell'interfaccia grafica del modello di pericolosità europea SHARE.

Focalizzandosi soltanto sulla penisola italiana, il modello di pericolosità europeo si presenta in questo modo (fig.33).



Fig.33: Mappa interattiva della pericolosità europea SHARE.

Dalla figura 33 è possibile vedere come è distribuita la pericolosità sismica italiana secondo SHARE.

La scala dei colori di rappresentazione dei valori di PGA su mappa, relativi alla probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, utilizzata dagli autori non permette la distinzione netta di zone più pericolose e altre no.

Anche solo visivamente si può notare che il modello di pericolosità SHARE prevede scuotimenti più alti rispetto al modello MPS04. Infatti, il modello mette in evidenza che tutta la penisola italiana sia caratterizzata da terremoti che producono alti valori di accelerazioni attese al suolo.

Per quanto riguardo l'accesso ai dati di pericolosità, rispetto a MPS04 non bisogna selezionare il nodo della griglia o scegliere quello più vicino alla posizione del monumento. Infatti, basta inserire soltanto le coordinate di Latitudine e Longitudine del sito archeologico su cui fare le analisi, e si ha facilmente accesso alla libreria dei dati di pericolosità calcolati su un suolo rigido di tipo A.

Un esempio di utilizzo della mappa interattiva, per accedere ai dati di pericolosità è stato fatto per il tempio di Apollo (Siracusa-Ortigia), ed è rappresentato dalla figura 34.



Fig.34: Esempio di utilizzo dell'interfaccia grafica di SHARE, per scaricare i valori di pericolosità per il tempio di Apollo Ortigia, in Siracusa.

MPS19

Il nuovo modello di pericolosità italiano MPS19 ancora non dispone di una piattaforma web-Gis dove, inserendo le coordinate di Latitudine e Longitudine dei monumenti scelti del dataset, è possibile scaricare i dati di pericolosità.

Quindi i dati di pericolosità per ogni monumento e già adattati alla tipologia di suolo sono stati forniti dal tutor di questa tesi, il professor Warner Marzocchi, uno dei coordinatori del gruppo di ricerca per la realizzazione del nuovo modello di pericolosità.

I dati sono quindi stati presentati secondo una tabella Excel, dove per ogni valore di PGA si associa il corrispettivo valore di probabilità di eccedenza POE.

Una parte di questo file Excel, caratterizzato da una lunga stringa di valori viene mostrata dalla figura numero 35.

	PGA	0.0010	0.0012	0.0015	0.0019	0.0024	0.0030	0.0037	0.0046
Colonne di San Lorenzo (Milano)		4.07E-01	3.68E-01	3.28E-01	2.88E-01	2.50E-01	2.14E-01	1.80E-01	1.50E-01
Foro Romano (Velleia)		4.93E-01	4.60E-01	4.25E-01	3.88E-01	3.51E-01	3.14E-01	2.78E-01	2.43E-01
Capitolium Romano di Brescia		4.71E-01	4.34E-01	3.96E-01	3.57E-01	3.18E-01	2.80E-01	2.45E-01	2.12E-01
Tempio di Hera Lacinia (Capo Colonna)		5.16E-01	4.78E-01	4.38E-01	3.96E-01	3.53E-01	3.12E-01	2.71E-01	2.33E-01
Tempio C Selinunte		3.22E-01	2.93E-01	2.63E-01	2.32E-01	2.03E-01	1.74E-01	1.48E-01	1.24E-01
Tempio di Segesta		2.62E-01	2.35E-01	2.09E-01	1.83E-01	1.58E-01	1.35E-01	1.14E-01	9.43E-02
Foro Romano (Aquileia)	POE	4.83E-01	4.50E-01	4.14E-01	3.76E-01	3.37E-01	2.98E-01	2.59E-01	2.21E-01
Porticato Romano (La Cuma)		5.82E-01	5.45E-01	5.05E-01	4.62E-01	4.19E-01	3.74E-01	3.30E-01	2.88E-01
Tempio Concordia (Valle dei Templi)		3.69E-01	3.34E-01	2.98E-01	2.62E-01	2.27E-01	1.93E-01	1.63E-01	1.35E-01
Basilica Sepino		5.06E-01	4.71E-01	4.34E-01	3.96E-01	3.58E-01	3.21E-01	2.84E-01	2.49E-01
Tempio di Nettuno (Paestum)		4.32E-01	3.99E-01	3.64E-01	3.29E-01	2.94E-01	2.59E-01	2.25E-01	1.94E-01
Tempio di Apollo Ortigia (Siracusa)		2.81E-01	2.49E-01	2.19E-01	1.91E-01	1.64E-01	1.40E-01	1.18E-01	9.90E-02
Tempio di Hera (Metaponto)		3.62E-01	3.27E-01	2.92E-01	2.57E-01	2.23E-01	1.91E-01	1.62E-01	1.36E-01
Tempio Poseidone-(Taranto)		3.30E-01	2.93E-01	2.56E-01	2.21E-01	1.88E-01	1.58E-01	1.32E-01	1.08E-01

Fig.35: Tabella dei dati di pericolosità del modello MPS19 espressi in PoE-PGA, per i monumenti scelti del progetto di tesi.

3.3. RICERCA DELLE CURVE DI FRAGILITA' E VERIFICHE PER IL LORO UTILIZZO

Come descritto nei capitoli precedenti, la determinazione delle curve di fragilità permette di poter calcolare le probabilità di superamento dello stato limite di ribaltamento mediante il calcolo del rischio sismico.

In questo lavoro di tesi, esse non sono state stimate direttamente, ma sono state quantificate mediante una ricerca bibliografica relativa agli specifici monumenti scelti.

Solo per il monumento di Siracusa del Tempio di Apollo è stato trovato un lavoro di bibliografia (Kavvadias et al. del 2017) specifico per tale monumento.

Mentre per le altre strutture questo non è stato possibile. Quindi, la strategia utilizzata è stata quella di usare: 1) curve di fragilità di monumenti greci/romani non costruiti in Italia. 2) valutazione delle stesse in maniera indiretta attraverso relazioni empiriche di ribaltamento disponibili in letteratura.

Riguardante il primo caso, se i monumenti di bibliografia possedevano le stesse caratteristiche geometriche di quelli utilizzati del dataset, allora le funzioni di fragilità erano idonee per poter essere utilizzate per il calcolo del rischio sismico. In base a questa considerazione, sono state utilizzate le curve di fragilità prodotte del lavoro di bibliografia di Pappas et al. 2016 e Kavvadias et al. 2017.

Mentre riguardando il secondo caso è stata utilizzata la relazione empirica di collasso, tratta dal lavoro di bibliografia di Papadoupolos et al. 2019. Dove considerando un set di 14 accelerogrammi sono stati ricavati 14 valori di PGA di collasso, utili per poter determinare così una funzione di fragilità per ogni monumento scelto.

Di seguito, verranno illustrati i criteri di compatibilità che hanno portato all'utilizzo delle funzioni di fragilità pubblicate da Kavvadias e Pappas. E verranno illustrate le operazioni di calcolo, che hanno portato all'elaborazione di curve di fragilità tratte dalla relazione empirica del lavoro di Papadoupolos.

KAVVADIAS et al. 2017

Il lavoro di Kavvadias et al., del 2017, fornisce la curva di fragilità specifica per il monumento del tempio di Apollo di Siracusa, nell'isola di Ortigia. Gli autori hanno risolto l'equazione del rocking (10) mediante l'utilizzo di una selezione degli accelerogrammi naturali (terremoti).

Il parametro di domanda Ingegneristica EDP utilizzato è la massima rotazione in valore assoluto $|\theta_{max}|$, normalizzata all'accelerazione di overturning (collasso) α ed espresso dall'equazione 24:

$$EDP = \frac{|\theta_{max}|}{\alpha}$$
 (24)

La valutazione della curva di fragilità è stata fatta applicando l'approccio prestazionale. Ossia è stato scelto un livello di performance, stato limite contemplato, che superato il quale comporta alla valutazione della fragilità della struttura.

Gli autori hanno considerato come stato limite quello di danno ed è rappresentato dal collasso/ribaltamento della struttura. Il valore soglia *edp*, riferito a questo livello di performance utilizzato nell'equazione della curva di fragilità è uguale a 1.

Per lo stesso monumento gli autori hanno calcolato tre curve di fragilità mediante due approcci statistici differenti: uno multivariato e l'altro univariato.

Per quanto riguarda il primo caso, gli autori tramite tecniche statistiche multivariate sono riusciti a determinare la funzione di fragilità di queste strutture, mediante la combinazione di due parametri d'intensità sismica come lo scuotimento orizzontale atteso (PGA) e il periodo medio (Tm).

La misura di *Tm* rappresenta il periodo di vibrazione medio associato ad un accelerogramma ed è la misura del suo contenuto in frequenza calcolato considerando lo spettro d'ampiezza. (Rathje et al.,1998).

Mentre per quanto riguarda il caso univariato, la determinazione di curve della funzione di fragilità è avvenuta soltanto considerando un solo parametro d'intensità sismica: la PGA.

La determinazione della fragilità sismica, attraverso un approccio multivariato, permette di ridurre l'incertezza epistemica sul comportamento di questa tipologia di struttura quando soggetta a sforzo di taglio. (Gehl et al., 2013)

Infatti, per questo motivo gli autori hanno voluto evidenziare le differenze di forma delle curve di fragilità ottenute mediante due approcci statistici differenti e i risultati ottenuti da queste valutazioni sono rappresentate dalla figura 36.



Fig.36: Esempio di curve di fragilità per il Tempio di Apollo-Ortigia situato a Siracusa, calcolate per uno stato limite di danno moderato. Le curve tratteggiate in nero sono le funzioni di fragilità calcolate utilizzando un approccio statistico multivariato (mediante l'uso di una misura di intensità vettoriale composta dalla coppia PGA e Tm). Mentre la curva continua grigia è la funzione di fragilità calcolate considerando l'approccio statistico univariato (misura di intensità scalare, PGA).

In figura 36 si mostra un esempio di tre curve di fragilità calcolate per il monumento di Siracusa-Ortigia, per uno stato limite di danno moderato.

Dalla figura 36, si evince che la curva di fragilità univariata risulta la meno accurata tra le tre proposte rispetto alle due curve calcolate con l'approccio statistico multivariato.

Oltre alla curva di fragilità calcolata per uno stato limite moderato, rappresentata dalla figura 36, l'autore in una tabella ci ha forniti i valori di probabilità di superamento di uno stato limite di collasso del monumento di Siracusa per poter determinare la relativa curva di fragilità. La tabella riepilogativa dei seguenti valori di probabilità, calcolati attraverso un approccio statistico multivariato e univariato, è mostrata dalla figura 37.

Limit States	PGA (g)			T _m (s)	
		0.5	1	1.5	univariate
LS	0.5	0.44	0.97	1.00	0.45
	1	0.91	1.00	1.00	0.59
	1.5	0.99	1.00	1.00	0.68
	univariate	0.24	0.83	0.99	-
LS	0.5	0.09	0.77	0.97	0.25
	1	0.56	0.99	1.00	0.39
	1.5	0.85	1.00	1.00	0.46
	univariate	0.05	0.50	0.92	-
LSIII	0.5	0.02	0.45	0.84	0.18
	1	0.09	0.73	0.96	0.29
	1.5	0.19	0.85	0.98	0.20
	univariate	0.01	0.33	0.86	-

Table 6. Probability values of exceeding the stated performance levels for univariate and bivariate IMs

Fig.37: Tabella riepilogativa dei valori di Probabilità di superamento per uno specifico stato limite di danno. In particolare, con LS_I , LS_{II} , LS_{III} si identifica uno stato limite di danno lieve, moderato e di collasso calcolato attraverso un approccio statistico multivariato e univariato.

In particolare, come si evince dalla figura 37, i valori di probabilità sono calcolate da Kavvadias per un *Tm* uguale a 0.5 secondi, 1 secondo e 1.5 secondi.

Per sapere quali valori di probabilità utilizzare, è stata fatta una ricerca degli accelerogrammi di terremoti italiani forti avente una Magnitudo compresa tra 5 e 8 e per ognuno di questi è stato calcolato il loro periodo di vibrazione medio (Tm).

Una volta determinato per questi terremoti il Tm, i risultati sono stati confrontati con quelli utilizzati dagli autori di bibliografia, per la realizzazione delle curve di fragilità.

I valori del periodo medio ottenuti più vicini a 0.5 secondi 1 secondo e 1.5 secondi indicherà quali valori di probabilità utilizzare per poter determinare la curva di fragilità.

Per questa verifica di compatibilità sono stati proposti i risultati dei seguenti terremoti scaricati dal database ITACA dell'INGV:

- Terremoto Irpinia (30/11/1980) avente una magnitudo momento (Mw) di 6.9.
- Terremoto Aquila (6/04/2009) di magnitudo momento (Mw) pari a 6.3.
- Terremoto dell'Emilia (20/05/2012) avente una magnitudo momento (Mw) pari a 6.1.
- Terremoto di Norcia (30/10/2016) di magnitudo momento (Mw) pari a 6.5.

Per i seguenti terremoti la stima di (Tm) è avvenuta considerando il lavoro di Rathje et al.,1998.

Per ogni accelerogramma scelto, viene effettuata la trasformata di Fourier ottenendo così il suo spettro di ampiezza.

Una volta ottenuto lo spettro di ampiezza è stato possibile determinare il Tm applicando la seguente formula:

$$T_m = \frac{\sum_i C_i^2 \cdot \left(\frac{1}{f_i}\right)}{\sum_i C_i^2} \quad (25)$$

Dove per:

- C_i si intendono le ampiezze di Fourier dell'intero accelerogramma.
- f_i si intendono le frequenze discrete della trasformata di Fourier comprese tra 0.25 Hz e 0.20.

L'elaborazione degli spettri d'ampiezza delle registrazioni sismiche e la valutazione del parametro Tm è avvenuto utilizzando il software Matlab. Di seguito nelle figure 38,39,40 sono mostrati graficamente i passaggi descritti precedentemente per il calcolo del periodo medio, mostrando come esempio l'evento dell'Aquila del 2009.



Fig.38: Accelerogramma del terremoto dell'Aquila 2009, registrato presso la stazione AQK, scaricato attraverso il Database Itaca (INGV).



Fig.39: Spettro di ampiezza del terremoto dell'Aquila 2009 registrato alla stazione AQK.



Fig.40: *Plot delle ampiezze dello spettro del terremoto dell'Aquila del 2009 sul tempo. La linea rossa è il periodo medio calcolato attraverso la formula di Rathje et al.,1998 ed è pari a 0.30 s.*

Dalla figura 40 si osserva che il periodo medio, rappresentato da una linea rossa, calcolato per il terremoto dell'Aquila è di 0.30 s. Mentre per i terremoti di Norcia, Emilia ed Irpinia il *Tm* stimato sono rispettivamente uguali a: 0.25 s, 0.20 s, 0.30 s.

I seguenti risultati sono più vicini ai valori di *Tm* pari a 0.5 s; quindi, sono stati utilizzati per le nostre analisi, dalla tabella rappresentata dalla figura 37, i corrispettivi valori di fragilità calcolati dall'autore di bibliografia.

Una volta calcolata la curva di Kavvadias per il monumento di Siracusa, per uno stato limite di collasso, considerando i valori della tabella rappresentata dalla figura 37, nel sottoparagrafo successivo verrà descritta l'analisi comparativa per valutare se questa funzione di fragilità è idonea anche per gli altri monumenti.

PAPPAS et al. 2016 ED ANALISI COMPARATIVA

Non essendo disponibili in letteratura curve di fragilità specifiche per i monumenti selezionati nel progetto di tesi, come il lavoro di Kavvadias che elabora la fragilità per il tempio di Siracusa, sono state utilizzate curve di fragilità calcolate per altri monumenti greci e romani non costruiti in Italia. In base a questa considerazione sono state utilizzate le funzioni di fragilità del lavoro di Pappas et al., del 2016.

Le funzioni di fragilità del lavoro di Pappas, a differenza di quelle di Kavvadias, non sono state determinate mediante un approccio multivariato e non sono state valutate considerando accelerogrammi naturali.

Un'altra differenza sulla valutazione della fragilità è stata la scelta del parametro di domanda ingegneristica EDP normalizzato utilizzato per caratterizzare la soglia di raggiungimento dello stato limite di ribaltamento (OT). Infatti, in questo lavoro è stato utilizzato il massimo spostamento orizzontale misurato al top della struttura u_{top} , ed espresso dall'equazione 26:

$$EDP = \frac{u_{top}}{D}$$
 (26)

Dove D è uguale al diametro della base della colonna.

Anche in questa pubblicazione la valutazione di questa funzione è stata fatta considerando lo stato limite di danno, ed è rappresentato dal ribaltamento di almeno un blocco della struttura.

Ugualmente al lavoro precedente il valore soglia di *edp* utilizzato per questo stato limite nell'equazione della curva di fragilità (eq.14) è uguale ad 1.

Le curve di fragilità di questo lavoro sono molteplici, perché gli autori hanno voluto esaminare come la vulnerabilità per questa tipologia di strutture dipenda dai seguenti parametri:

- Il tipo di suolo.
- L'altezza della colonna(H)
- La snellezza (S) della colonna, ossia il rapporto tra l'altezza della colonna e la sua base.
- Il numero di "Drum" (D), tamburi, costituenti la colonna.

Un esempio di funzione di fragilità del lavoro di Pappas dipendente dalla snellezza è mostrata dalla figura 41.



Fig.41: Curve di fragilità di Pappas. per un monumento avente un'altezza (H) di 6 metri, numero di Drum (D) 9 con snellezza (S) variabile.

In figura 41 viene mostrato, come la vulnerabilità per un momento avente un'altezza di 6 m e un numero dei drum (9) poggiante sulla stessa tipologia di suolo varia in funzione del parametro della snellezza (S).

Fondamentalmente è possibile osservare che una colonna avente alti valori di snellezza, come in questo caso S9-S8-S6, siano meno resistenti ad uno scuotimento sismico. Mentre per strutture più tozze, avente una snellezza più bassa, le strutture sono più resistenti.

Altro esempio di curva di fragilità di questo lavoro è mostrato dalla figura 42, dove la definizione della fragilità è dipendente sia dal numero dei blocchi e sia dal tipo di suolo.



Fig.42: Curve di fragilità di Pappas. per un monumento avente un'altezza (H) di 9 metri e con snellezza (S) di 8 e un numero di Drum (D) variabile.

Dalla figura 42, si può osservare come la vulnerabilità delle strutture cambia, in funzione del tipo di suolo e dal numero di blocchi. Il monumento in esame ha le seguenti caratteristiche: altezza (H) di 9 metri ed una snellezza (S) pari a 8. Considerando il tipo di suolo si deduce che dalle categorie migliori di suolo a quelle più scadenti, in questo caso da suolo B a suolo E, è possibile notare una diminuzione della stabilità della struttura dovuto agli effetti d'amplificazione di sito.

Mentre riguardanti il numero di blocchi si osserva che, le colonne costituite da più tamburi (es. D9) conferiscono una maggiore resistenza agli sforzi di taglio rispetto a quelle formate da un unico blocco (D1).

Per poter utilizzare le seguenti curve di letteratura, è stata necessaria un'analisi comparativa tra le colonne dei monumenti del dataset e quelle considerate dal seguente lavoro di bibliografia. Questa comparazione è stata fatta considerando le colonne come un unico blocco rigido: modello pendolo invertito di Housner. Ogni blocco di questo genere è definito dai due parametri geometrici la semi-diagonale R e l'angolo α (la snellezza) e il parametro di frequenza p. Pertanto, ogni monumento greco e romano del dataset e quelli utilizzati dal lavoro di Pappas, sono stati definiti secondo questi tre valori. In particolar modo note le misure dell'altezza della colonna e del diametro della base, facilmente è stato possibile determinare i parametri geometrici e di frequenza di questo tipo di strutture. I risultati ottenuti da questa modellizzazione sono mostrati in due tabelle. In particolare, nella tabella 2, vengono mostrati le strutture utilizzate da Pappas nel suo lavoro di bibliografia. Mentre nella tabella 3, sono elencati i monumenti utilizzati per il lavoro di tesi. Entrambe le tabelle contengono le seguenti informazioni:

- Nome (numero del monumento per quanto riguarda il lavoro di Pappas)
- Base (m)
- Altezza (m)
- Raggio (m)
- Semi altezza (m)
- Snellezza
- Classe di suolo
- Semi diagonale R (m)
- Angolo α
- Parametro di frequenza *p*

Monumento	Base (m)	Altezza(m)	Raggio (m)	Semi altezza(m)	Snellezza	Classe Suolo	R (m)	α (rad)	p(rad/s)
1	1.13	9.00	0.56	4.50	1.13	A/B/C/D/E	4.54	0.12	1.27
2	0.75	6.00	0.38	3.00	0.75	A/B/C/D/E	3.02	0.12	1.56
3	1.50	6.00	0.75	3.00	1.50	С	3.09	0.24	1.54
4	1.20	6.00	0.60	3.00	1.20	С	3.06	0.20	1.55
5	1.00	6.00	0.50	3.00	1.00	С	3.04	0.17	1.56
6	0.67	6.00	0.33	3.00	0.67	С	3.02	0.11	1.56
7	1.50	9.00	0.75	4.50	1.50	C	4.56	0.17	1.27
8	0.50	3.00	0.25	1.50	0.50	C	1.52	0.17	2.20
9	1.00	9.00	0.50	4.50	1.00	С	4.53	0.11	1.27
10	0.75	3.00	0.38	1.50	0.75	С	1.55	0.24	2.18

 Tab.2: Modellizzazione dei monumenti di Pappas, secondo il modello di Housner.

Monumenti	Base	Altezza (m)	Raggio (m)	Semialtezza	Snellezza	Classe	R	α	p(rad/s)
	(m)			(m)		di suolo	(m)	(rad)	
Tempio Nettuno (Paestum-Campania)	2	8.88	1	4.44	4.44	C	4.55	0.22	1.27
Tempio Concordia-(Agrigento-Sicilia)	1.11	6.67	0.555	3.335	6.00	С	3.38	0.16	1.48
Tempio C-(Selinunte-Sicilia)	1.43	8.62	0.715	4.31	6.02	С	4.37	0.16	1.30
Tempio di Hera Lacinia (Capo Colonna-	1.39	8.35	0.695	4.175	6.00	С			
Crotone)							4.23	0.16	1.32
Tempio Poseidone-(Taranto-Puglia)	1.41	8.47	0.705	4.235	6.00	В	4.29	0.16	1.31
Tempio di Hera (Metaponto-Basilicata)	1	6	0.5	3	6	В	3.04	0.17	1.56
Tempio Segesta-(Calatafimi-Sicilia)	1.5	9	0.75	4.5	6	А	4.56	0.17	1.27
Tempio Apollo-Ortigia (Siracusa-Sicilia)	1.32	6.62	0.66	3.31	5.01	А	3.38	0.20	1.48
Porticato Romano (La Cuma-Marche)	0.97	6.8	0.485	3.4	7.01	В	2.41	0.17	1.75
Colonne San Lorenzo-(Milano- Lombardia)	0.87	7.3	0.435	3.65	8.39	C	4.54	0.12	1.27
Capitolium Romano-(Brescia-Lombardia)	1.18	9.5	0.59	4.75	8.05	С	4.79	0.12	1.24
Basilica Romana (Sepino-Molise)	0.87	6.15	0.435	3.075	7.06	В	3.12	0.17	1.54
Foro Romano (Velleia)	0.91	4.56	0.455	2.28	5.01	C	2.32	0.20	1.78
Foro Romano- (Aquileia)	0.62	5	0.31	2.5	8.06	C	2.52	0.12	1.71

 Tab.3: Modellizzazione dei modelli della tesi, secondo il modello di Housner.
Dal confronto delle due tabelle è stato riscontrato che, nonostante i monumenti siano di dimensioni e materiale diversi, la comparazione tra di loro ha avuto dei buoni risultati. Infatti, c'è stata una buona correlazione dei tre parametri scelti tra le colonne utilizzate per questo lavoro di tesi e quelli di bibliografia.

In tabella 4 sarà mostrato per ogni monumento scelto, con la rispettiva classe di suolo, quale curva di Pappas è stata utilizzata per le stime di attendibilità.

Monumenti Dataset	Classe	Monumento	Classe di Suolo
	di suolo	Pappas	curve Pappas
Tempio Nettuno (Paestum-Campania)	С	1	A/B/C/D/E
Tempio Concordia-(Agrigento-Sicilia)	C	5	С
Tempio C-(Selinunte-Sicilia)	C	7	С
Tempio di Hera Lacinia (Capo	С	7	С
Colonna-Crotone)			
Tempio Poseidone-(Taranto-Puglia)	В	7	С
Tempio di Hera (Metaponto-			
Basilicata)	В	5	С
Tempio Segesta-(Calatafimi-Sicilia)	А	7	С
Tempio Apollo-Ortigia (Siracusa-	А	4	С
Sicilia)			
Porticato Romano (La Cuma-Marche)	В	5	С
Colonne San Lorenzo-(Milano-	С	1	A/B/C/D/E
Lombardia)			
Capitolium Romano-(Brescia-	С	1	A/B/C/D/E
Lombardia)			
Basilica Romana (Sepino-Molise)	В	5	С
Foro Romano (Velleia)	С	4	С
Foro Romano- (Aquileia)	С	2	A/B/C/D/E

Tab.4: Associazione di ogni monumento del dataset con la relativa curva di fragilità di bibliografia.

Dalla tabella 4 si rileva che, la maggior parte delle curve di fragilità della letteratura sono state elaborate su suolo di Tipo C.

Nei casi in cui non vi è concordanza tra le classi di suolo tra i monumenti scelti e quelli di bibliografia, è stato applicato l'approccio semplificativo di normativa sismica descritto precedentemente. Attraverso questa operazione le curve di fragilità della letteratura sono state ricalcolate, in base alle categorie di suolo dei monumenti del dataset.

La stessa analisi comparativa è stata fatta anche per la curva di bibliografia di Kavvadias, per verificare se essa fosse idonea all'utilizzo anche per gli altri monumenti.

La curva di Kavvadias modellizzata secondo il modello di Housner, presenta i seguenti parametri elencati nella tabella 5:

Parametri monumento Kavvadias				
Base (m)	1.14			
Altezza(m)	8			
Raggio (m)	0.57			
Semi altezza(m)	4			
Snellezza	7.07			
Classe Suolo	А			
R (m)	4.54			
α (rad)	0.142			
p(rad/s)	1.34			

Tab:5: Modellizzazione del monumento di Kavvadias, secondo il modello di Housner.

Dal confronto dei parametri **R**, α , **p** del monumento di Kavvadias con la tabella 3 precedentemente mostrata, si è visto che la curva specifica del monumento di Siracusa, trova una buona correlazione nei parametri anche con gli altri monumenti scelti che compongono il dataset. Da questa considerazione, quindi è possibile dire che questa funzione di fragilità può essere utilizzata anche per gli altri monumenti utilizzati che compongono il dataset.

Nonostante l'autore abbia calcolato la curva di fragilità di Kavvadias sul suolo di tipo A, essa è stata lo stesso utilizzata anche per gli altri monumenti trascurando gli effetti di sito dovuti all'interazione tra suolo e struttura. La curva di Kavvadias utilizzata per il calcolo del rischio sismico avendo una media μ di 3.3g e deviazione standard σ pari a 0.89g è mostrata dalla figura 43.



Fig.43: Curva di fragilità di Kavvadias utilizzata per tutti i monumenti della tesi mediante l'analisi comparativa.

PAPADOUPOLOS et al. 2019

In questo lavoro di bibliografia gli autori hanno permesso di identificare una relazione empirica di soglia di ribaltamento per quanto riguarda monumenti greci e romani. Questa relazione rappresenta una prima stima sulla valutazione della vulnerabilità su questa tipologia di strutture.

La relazione empirica che propongono gli autori tiene conto: delle caratteristiche geometriche dei monumenti (diametro d e altezza H), caratteristiche dinamiche (parametro p di frequenza), parametro di input sismico come il periodo predominante T_g dello spettro di risposta di pseudo velocità smorzato al 5 %, dove dal quale si ricava il parametro di frequenza w_g ($2\pi/T_g$), dello stato di conservazione del monumento γ e infine dall'accelerazione di gravità g (9.81 m/s^2). La seguente relazione con i parametri sopra citati viene rappresenta dall'equazione 27:

$$PHA_{critic} \ge \gamma \cdot 0.23 \cdot g \cdot (d/H) \cdot e^{0.37 \cdot \omega_g/p}$$
(27)

Sebbene questa relazione rappresenti una prima stima sull'identificazione di una soglia di ribaltamento per questa tipologia di strutture, vista la presenza di un parametro che rappresenta il contenuto di frequenza del moto sismico è stato possibile determinare delle funzioni di fragilità.

Sono stati raccolti dal database ITACA, un set di 14 accelerogrammi Le seguenti registrazioni, presentano le seguenti caratteristiche: possiedono una magnitudo momento M compresa tra 5 e 7; le stazioni, dalle quali sono state ricavate le registrazioni, dovevano essere localizzate sulla stessa tipologia di suolo dei monumenti e le distanze epicentrali non dovevano superare i 40 Km.

Di seguito nella tabella 5 viene mostrato il set di accelerogrammi utilizzati per la valutazione del parametro di ground motion (T_g) presente all'interno dell'equazione di Papadoupolos.

Eventi	Magnitudo (Mw)	Data Evento	Suolo delle registrazioni
Aquila	6	06-04-2009-01:32:40	A, B, C
Emilia	6	20-05-2012-02:03:50	С
Irpinia	6.9	23-11-1980-18:34:53	A, B
Norcia	6.5	30-10-2016-06:40:18	A, B, C
San Gregorio Matese (CE)	5	2013-12-29-17:08:43	A, B, C
Carrara	5.1	21-06-2013-12:33:56	A, B, C
Visso Marche	5.9	26-10-2016-19:18:06	A, B, C
Castelsantangelo sul Nera (Marche)	5.4	2016-10-26-17:10:36	A, B, C

-			
Mormanno-Cosenza	5	25-10-2012-23:05:24	A, B, C
Umbria-Marche Mw	5.7	26-09-1997-02:33:11	A, B, C
Rotonda (PZ)-Calabria	5.6	09-09-1998-11:28:00	A, B, C
Villetta Barrea-Abruzzo	5.5	1984-05-11-10:41:48	A, B, C
Pescopagano-Basilicata	5.2	16-01-1981-00:37:45	A, B, C
Gemona del Friuli-Friuli	6	15-09-1976-09:21:18	A, B, C
Amatrice-Accomuli	6	24-08-2016-01:36:32	A, B
Settefratti-Lazio	5.9	07-05-1984-17:49:43	С

Tab.5: Set di accelerogrammi considerati per la valutazione del periodo predominante Tg dello spettro di pseudo-velocità smorzato al 5% presente nella relazione di Papadoupolos et al. 2019.

Una volta selezionati gli accelerogrammi, sono stati valutati su Matlab gli spettri di risposta di Pseudo-Velocità smorzati al 5%. I seguenti spettri ci danno informazione di come si comportano queste strutture quando sollecitati da sforzi di taglio.

Il parametro che viene considerato è il periodo predominante, che corrisponde al picco dello spettro di risposta di Pseudo-Velocità.

Quindi, per ogni evento sono stati presi le registrazioni delle due componenti orizzontali Nord-Sud (NS) ed Est-Ovest (EW). Da questi sono stati individuati i picchi massimi degli spettri di risposta ed è stata fatta una media tra i due periodi predominanti, secondo la relazione 28:

$$\overline{T_g} = \frac{T_{g_{EW}} + T_{g_{NS}}}{2} \quad (28)$$

Un esempio della sua determinazione con la procedura appena descritta è stato fatto per l'evento dell'Aquila del 2009, dove gli spettri di pseudo velocità delle due componenti sono rappresentate dalle figure 44 e 45.



Fig.44: Spettro di Pseudo-Velocità smorzato al 5% della registrazione orizzontale (EW) dell'evento dell'Aquila del 2009, in blu è rappresentato il picco del periodo predominante dello spettro di Pseudo-Velocità.



Fig.45: Spettro di Pseudo-Velocità smorzato al 5% della registrazione orizzontale (NS) dell'evento dell'Aquila del 2009, in blu è rappresentato il picco del periodo predominante dello spettro di Pseudo-Velocità.

Una volta determinato il periodo predominante, si è passati alla valutazione del parametro di frequenza $w_g (2\pi/T_g)$ utilizzato da Papadoupolos nella relazione empirica di collasso.

Dunque, per ogni monumento e secondo il set di accelerogrammi utilizzati, si sono ottenuti 14 valori di PGA di collasso ottenuti dalla risoluzione dell'equazione di Papadoupolos, considerando come fattore di conservazione γ suggerito dagli autori pari a 0.65.

I risultati sono stati divisi per classe di suolo e sono rappresentati dalle tabelle 6,7,8.

Eventi	T_q	W_q	РНА	РНА
	3	3	(Siracusa)	(Segesta)
Aquila MW 6	0.49	12.82	0.74	1.04
Irpinia Mw 6.9	1.09	5.76	0.13	0.13
Norcia Mw 6.5	0.44	14.27	1.07	1.59
San Gregorio Matese (CE) Mw 5	0.16	39.25	557.35	2306.16
Carrara Mw 5.1	0.37	16.97	2.10	3.50
Visso Mw 5.9 Marche	0.58	10.83	0.45	0.58
Castelsantangelo sul Nera (Marche) Mw 5.4	0.27	23.26	10.13	21.85
Mormanno-Cosenza- Mw 5	0.55	11.42	0.52	0.69
Umbria-Marche Mw 5.7	0.24	26.17	21.00	50.98
Rotonda (PZ)-Calabria Mw 5.6	0.64	9.81	0.35	0.43
Villetta Barrea-Abruzzo Mw 5.5	0.63	9.97	0.36	0.45
Pescopagano-Basilicata-Mw 5.2	0.18	34.89	186.85	647.24
Gemona del Friuli-Friuli- Mw 6	1.04	6.04	0.14	0.14
Amatrice-Accomuli Mw 6	0.53	11.85	0.58	0.79

Suolo A

Tab.6: Valori di collasso ottenuti dalla relazione di Papadoupolos, per i monumenti situati su suolo A. I valori delle colonne Tg e wg, rappresentano rispettivamente i valori di periodo predominante e frequenza degli accelerogrammi considerati.

Suolo B

			PHA (Monte	PHA	РНА
Eventi	Tg	wg	Rinaldo)	(Sepino)	(Metaponto)
Aquila Mw 6	1.51	4.16	0.06	0.07	0.07
Irpinia Mw 6.9	1.05	5.98	0.09	0.11	0.10
Norcia Mw 6.5	0.98	6.41	0.10	0.12	0.11
San Gregorio Matese (CE) Mw					
5	0.58	10.83	0.25	0.34	0.33
Carrara Mw 5.1	0.4	15.70	0.70	1.10	1.05
Visso Mw 5.9 Marche	0.2	31.40	19.47	48.14	43.87
Castelsantangelo sul Nera					
(Marche) Mw 5.4	0.25	25.12	5.15	10.60	9.84
Mormanno-Cosenza- Mw 5	0.41	15.32	0.65	1.00	0.95
Umbria-Marche Mw 5.7	0.26	24.15	4.20	8.40	7.82
Rotonda (PZ)-Calabria Mw 5.6	0.36	17.44	1.01	1.67	1.58
Villetta Barrea-Abruzzo Mw					
5.5	0.17	36.94	62.95	182.97	164.04
Pescopagano-Basilicata-Mw					
5.2	0.23	27.30	8.18	17.94	16.55
Gemona del Friuli-Friuli- Mw 6	0.57	11.02	0.26	0.35	0.34
Amatrice-Accomuli Mw 6	0.47	13.36	0.43	0.62	0.60

Tab.7: Valori di collasso ottenuti dalla relazione di Papadoupolos, per i monumenti situati su suolo B. I valori delle colonne Tg e wg, rappresentano rispettivamente i valori di periodo predominante e frequenza degli accelerogrammi considerati.

SUOLO C

E (т		PHA	PHA	PHA	PHA	PHA	PHA	PHA	PHA	PHA
Eventi	Ig	wg	(Paestum)	(Agrigento)	(Selinunte)	(Crotone)	(Taranto)	(Milano)	(Brescia)	(Aquileia)	(velleia)
Aquila-MW-6	1.37	4.58	0.13	0.08	0.09	0.09	0.09	0.06	0.07	0.05	0.08
Emilia-MW-6	0.7	8.97	0.46	0.24	0.32	0.31	0.31	0.20	0.27	0.13	0.19
Norcia-Mw-6.5	0.68	9.24	0.50	0.25	0.35	0.33	0.34	0.22	0.29	0.14	0.20
San Gregorio Matese	;										
(CE) Mw-5	0.51	12.31	1.21	0.55	0.83	0.79	0.81	0.49	0.73	0.27	0.39
Carrara-Mw-5.1	0.19	33.05	508.90	99.54	308.52	266.88	285.23	120.22	358.79	23.85	28.96
Visso-Mw-5.9-Marche	0.58	10.83	0.79	0.38	0.54	0.52	0.53	0.33	0.47	0.19	0.28
Castelsantangelo sul Nera											
(Marche)-Mw-5.4	0.22	28.55	137.00	32.12	85.29	75.29	79.74	36.36	93.41	8.98	11.34

	I	1	1					1			
Mormanno-Cosenza-Mw											
5	0.41	15.32	2.91	1.16	1.96	1.84	1.89	1.09	1.80	0.51	0.72
Umbria-Marche-Mw-5.7	1.06	5.92	0.19	0.11	0.13	0.13	0.13	0.09	0.11	0.07	0.10
Rotonda (PZ)-Calabria-											
Mw-5.6	0.86	7.30	0.28	0.16	0.20	0.19	0.20	0.13	0.16	0.09	0.14
Villetta Barrea-Abruzzo-											
Mw-5.5	1.14	5.51	0.17	0.10	0.12	0.12	0.12	0.08	0.10	0.06	0.09
Pescopagano-Basilicata-											
Mw-5.2	0.3	20.93	14.93	4.76	9.72	8.88	9.26	4.83	9.62	1.73	2.33
Gemona del Friuli-Friuli-											
Mw-6	0.76	8.26	0.37	0.20	0.26	0.25	0.26	0.17	0.22	0.11	0.17
Settefratti-Lazio- Mw-5.9	0.47	13.36	1.65	0.71	1.12	1.06	1.09	0.65	1.00	0.34	0.48

Tab.8: Valori di collasso ottenuti dalla relazione di Papadoupolos, per i monumenti situati su suolo C. I valori delle colonne Tg e wg, rappresentano rispettivamente i valori di periodo predominante e frequenza degli accelerogrammi considerati.

Dalle tabelle sopra mostrate, si evince che per eventi in cui si registrano bassi valori di periodo predominante (alti valori di frequenza) si notano valori molto alti e probabilmente non affidabili per la soglia di ribaltamento.

Questi alti valori influenzavano sulla valutazione della media e deviazione standard e non permettevano una accurata determinazione della funzione di fragilità.

Pertanto, per evitare questa influenza di questi risultati si è assunto che i valori di collasso si distribuiscono secondo una distribuzione di tipo lognormale. Da questa assunzione, è stato possibile ricavare i valori di media μ e deviazione standard σ mediante le relazioni di statistica ordinale. Infatti, tutti i valori di PGA di collasso ottenuti sono stati ordinati in ordine crescente e sono stati individuali i percentili utili per poter calcolare i parametri necessari per la definizione delle curve di fragilità. Di seguito sono riportate le relazioni di statistica ordinale utilizzate per la definizione dei parametri di media e deviazione standard utili per la definizione della curva di fragilità.

$$\mu = \log(\eta) = \log(p_{50})$$
$$\sigma = \log\left(\frac{p_{50}}{p_{16}}\right)$$

Durante il calcolo della deviazione standard si è preferito non utilizzare l'84° percentile, ma si è preferiti utilizzare il 50-esimo, poiché si ottenevano risultati troppo grandi rendendo la valutazione del sigma instabile.

Successivamente i parametri di media e deviazione standard ottenuti mediante le relazioni di statistica ordinale sono elencati nella tabella 9.

Monumenti	Media in $g(\mu)$	Deviazione standard in $g(\sigma)$
Tempio Nettuno (Paestum-Campania)	0.64	1.25
Tempio Concordia-(Agrigento-Sicilia)	0.31	1.08
Tempio C-(Selinunte-Sicilia)	0.44	1.23
Tempio di Hera Lacinia (Capo Colonna-Crotone)		1.21
	0.43	
Tempio Poseidone-(Taranto-Puglia)	0.44	1.22
Tempio di Hera (Metaponto-Basilicata)	1.00	2.19
Tempio Segesta-(Calatafimi-Sicilia)	0.92	0.94
Tempio Apollo-Ortigia (Siracusa-Sicilia)	0.66	0.81
Porticato Romano (La Cuma-Marche)	0.67	1.95
Colonne San Lorenzo-(Milano-Lombardia)	0.27	1.14
Capitolium Romano-(Brescia-Lombardia)	0.38	1.29
Basilica Romana (Sepino-Molise)	1.05	2.22
Foro Romano (Velleia)	0.17	0.93
Foro Romano- (Aquileia)	0.24	0.98

Tab.9:*Valori di Media* (μ) *e Deviazione standard logaritmica* (σ), *espressi in g, ottenuti mediante le relazioni di statistica ordinale, utili per la definizione delle curve di fragilità.*

Dai valori dei parametri mostrati nella tabella 9 è stato possibile calcolare le funzioni di fragilità, partendo da una formula empirica di collasso di bibliografia, per i monumenti scelti del nostro progetto di tesi.

Di seguito sono illustrate nelle figure 46, 47 e 48 le curve di fragilità dei monumenti divisi per le rispettive classi di suolo A, B e C, mentre in Appendice saranno rappresentati per ogni monumento tutte e tre le curve di fragilità degli autori di bibliografia (Pappas, Papadoupolos e Kavvadias), utilizzate per le nostre analisi.



Fig.46: *Curve di fragilità derivante dall'equazione empirica di collasso di Papadoupolos, per i monumenti che poggiano su suolo di tipo A.*



Fig.47: *Curve di fragilità derivante dall'equazione empirica di collasso di Papadoupolos, per i monumenti che poggiano su suolo di tipo B.*



Fig.48: Curve di fragilità derivante dall'equazione empirica di collasso di Papadoupolos, per i monumenti che poggiano su suolo di tipo C.

3.4. VERIFICA DEI RISULTATI E VALIDAZIONE DEI MODELLI DI PERICOLOSITA'

Una volta definite per ogni monumento le curve di pericolosità e le relative curve di fragilità, ottenute dalla bibliografia, è stato possibile calcolare le probabilità di ribaltamento relative alle seguenti strutture. Queste probabilità, come descritte nel capitolo precedente, sono state determinate attraverso il calcolo del rischio simico mediante il metodo dell'integrazione tra le due funzioni e il metodo semplificato DCFD.

Ottenute le seguenti probabilità, prima di poterle utilizzare per poter verificare l'attendibilità dei modelli di pericolosità MPS04, SHARE e MPS19 esse sono state sottoposte anche loro a verifica.

In particolare, è stata applicata la relazione 20 in cui il parametro λ_{OT} , calcolato con entrambe le metodologie di calcolo e rappresentante il numero di perdite medio atteso per quella struttura, doveva essere inferiore rispetto ad un valore limite ritenuto ammissibile λ_0 .

Il parametro λ_0 si ricava considerando le valutazioni sulla sicurezza sulle costruzioni esistenti, della nuova normativa tecnica (NTC 2018).

Le valutazioni sulla sicurezza agli stati limite sono basate su un approccio semi-probabilistico, dovuto all'utilizzo di coefficienti applicabili nella maggior parte dei casi. Per poter valutare l'azione sismica che agisce sulle costruzioni, bisogna individuare i coefficienti forniti dalla normativa per la specifica tipologia di costruzione.

I coefficienti forniti dalla normativa che determinano l'azione sismica che agiscono sulle costruzioni sono: il periodo di riferimento V_R e la probabilità di superamento di un prefissato stato limite nel periodo di riferimento scelto.

In particolare, il periodo di riferimento dipende da altri coefficienti: la Vita Nominale (V_N) e la classe d'uso (C_U) espressi secondo la seguente relazione (31):

 $V_R = V_N \times C_U \quad (29)$

Con il parametro V_N si intende la vita nominale della struttura a cui viene riferita la valutazione della sicurezza e per la quale viene eventualmente progettato un intervento di miglioramento sismico.

I valori della vita nominale che fornisce la normativa sono rappresentati dalla figura 49.

Tab. 2.4.I – Valori minimi della Vita nominale V_N di progetto per i diversi tipi di costruzioni

	TIPI DI COSTRUZIONI	Valori minimi di V _N (anni)
1	Costruzioni temporanee e provvisorie	10
2	Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari	50
3	Costruzioni con livelli di prestazioni elevati	100

Fig.49: Tabella Vita Nominale (V_N) in base ai tipi di costruzioni tratta dall'NTC2018.

Mentre per Classe d'uso C_U si intende l'importanza dell'edificio e dalle persone che lo frequentano. In particolare, esistono quattro tipi di classe d'uso e sono:

- Classe I uso saltuario o non utilizzato;
- Classe II uso frequente con normali affollamenti;
- Classe III uso molto frequente e/o con affollamenti significativi;
- Classe IV edificio strategico e uso molto frequente e/o con affollamenti significativi.

Per ogni tipo di classe d'uso esiste un coefficiente ed essi sono rappresentati dalla figura 50.

Tab. 2.4.II -	Valori del	coefficiente	d'uso C ₁
---------------	------------	--------------	----------------------

CLASSE D'USO	Ι	Π	Ш	IV
COEFFICIENTE C _U	0,7	1,0	1,5	2,0

Fig.50: Tabella coefficienti d'uso tratta dalle NTC2018.

Per ogni tipologia di struttura, va scelto qual è lo stato limite contemplato e nella normativa il superamento di tale stato limite è definito mediante il processo di Poisson. Quindi per ciascuna costruzione, in relazione al periodo di riferimento V_R ed allo stato limite considerato, cui è associata una probabilità di superamento P_{V_R} , può essere valutato il periodo di riferimento dell'azione sismica T_R .

Esso è calcolato mediante l'utilizzo dell'equazione 30 ed è:

$$T_{R} = -\frac{V_{R}}{\ln(1 - P_{V_{R}})} = -\frac{V_{N} \times C_{U}}{\ln(1 - P_{V_{R}})}$$
(30)

Nel progetto di tesi, le costruzioni considerate sono i monumenti greci e romani. Per questa tipologia di strutture è stato scelto come valore di vita nominale (V_N) pari a 50 anni, mentre una classe d'uso (C_U) numero 2 ($C_U = 1.0$). Mentre come stato limite, è stato scelto quello di collasso e la relativa probabilità di superamento P_{V_R} è uguale al 2%.

Sostituendo questi valori nella 30 si ottiene un periodo di ritorno pari a 2500 anni. Avendo calcolato il T_R è possibile ricavare il valore di rischio ammissibile espresso come tasso annuo medio di superamento λ_0 mediante la seguente relazione (31):

$$\lambda_0 = \frac{1}{T_R} \quad (31)$$

Per i valori ottenuti dalla relazione 30, il valore limite ritenuto ammissibile λ_0 applicando l'equazione 31 è uguale a 4 × 10⁻⁴.

Una volta ricavato questo valore limite dalle relazioni di normativa, i valori di λ_{OT} , ottenuti mediante il metodo dell'integrazione tra le funzioni di pericolosità e fragilità e il metodo DCFD, sono stati confrontati con questo valore di soglia secondo la relazione di disuguaglianza numero 20.

In base alla conoscenza se il monumento ha subito danni o meno da terremoto, è possibile affermare se la relazione è stata rispettata e se le stime effettuate siano attendibili o meno.

Di seguito, accertando la validità delle stime effettuate, si è passati alla verifica d'attendibilità dei modelli di pericolosità.

La seguente verifica si basa su due tipi di analisi: l'analisi di **consistenza** e l'analisi **comparativa**.

Per analisi di consistenza si intende osservare come i risultati ottenuti si distribuiscono, e se essi sono consistenti con le osservazioni dello stato di conservazione del monumento.

Mentre per analisi comparativa permette di confrontare statisticamente i risultati ottenuti dai diversi modelli MPS04, SHARE e MPS19 e vedere quale dei tre risulta essere più attendibile.

Il confronto statistico è avvenuto calcolando il parametro *Log-Likelihood score*, il quale è definito come il logaritmo della funzione di *verosimiglianza* espressa mediante la relazione 32:

$$LL^{k} = \sum_{i=1}^{N} log(p_{i}^{k})$$
(32)

Dove per:

- N= è il numero di monumenti considerati.
- p_i^k = rappresenta il valore di probabilità calcolato per il k-esimo modello di pericolosità.

Nell'analisi comparativa il valore di Log-Likelihood score più grande (sono sempre negativi) relativo ai due modelli, dice quale modello sia migliore tra quelli disponibili.

CAPITOLO 4

ANALISI DEI RISULTATI PER MPS04

In questo capitolo verranno descritte le fasi che hanno portato all'elaborazione del calcolo del rischio sismico, secondo la procedura descritta nel capitolo 2, considerando il modello di pericolosità MPS04.

Le elaborazioni dei dati sono state fatte utilizzando il software Matlab e le fasi di scrittura del programma, per la valutazione del rischio sismico sono state fatte in base alle considerazioni effettuate dal capitolo precedente. Ossia, dopo aver trovato per ogni monumento il punto della maglia specifico, sono stati scaricati le nove coppie di valori di **PGA-** λ (frequenza annuale di superamento) utili per la definizione della curva di pericolosità. I valori ricavati da MPS04 sono calcolati in base alla tipologia di suolo A e non tengono conto degli effetti di sito.

La maggior parte dei monumenti del dataset, sono fondati su suolo diverso da quello rigido e quindi i dati di pericolosità devono essere modificati in funzione degli effetti d'amplificazione. Questa operazione è avvenuta applicando l'approccio semplificativo di normativa (eq.22).

Adattata la funzione di Hazard alla tipologia di suolo, sono state apportate ulteriori modifiche alla funzione di pericolosità. La prima è consistita, nell'equispaziatura della funzione di pericolosità. La seconda invece è determinata da un processo d'estrapolazione, per considerare valori più grandi di accelerazioni attese al suolo.

L'equispaziatura della curva di hazard è avvenuta mediante l'applicazione del metodo matematico dell'interpolazione. La scelta dei nuovi punti da aggiungere, rispetto ai 9 già esistenti, è avvenuta mediante l'utilizzo di una funzione matematica che passa per i valori già stimati.

Visto l'andamento lineare della curva in scala logaritmica è stato scelto come tipo di interpolazione quella lineare. Ovvero ogni punto stimato è unito da dei segmenti, delle spezzate e scegliendo un'unità di spaziatura omogenea si è ottenuta così una campionatura della funzione in maniera costante.

L'estrapolazione dei valori di PGA al di fuori di quelli forniti dalla mappa di pericolosità, è avvenuto attraverso il metodo della regressione lineare.

Ossia una volta individuato il tratto più lineare della curva di pericolosità già interpolata, è stata fatta partire una retta che segue l'andamento della

curva. L'estrapolazione dei valori attraverso questa metodologia è avvenuta fino ad un valore di 4g.

Terminato il processing sulla curva di pericolosità, si è passati alla seconda fase della scrittura del programma: la stima delle curve di fragilità.

Per quanto riguarda le curve di bibliografia di Pappas e Kavvadias, attraverso l'analisi comparativa è stato possibile identificare per ogni monumento quale funzione di fragilità utilizzare. Per le seguenti funzioni di bibliografia è stato possibile ricavare la media μ e la deviazione standard σ di queste funzioni applicando le seguenti relazioni di statistica ordinale:

$$\mu = \log (x_{50})$$
$$\sigma = \frac{1}{2} \log \left(\frac{x_{84}}{x_{16}}\right)$$

Mentre per le funzioni di fragilità di Papadoupolos le curve di fragilità calcolate per ogni monumento sono state ricavate applicando le relazioni descritte nel capitolo precedente.

Successivamente alla stima delle funzioni di pericolosità e fragilità per ogni sito, si è giunti alla fase finale della stesura del programma consistita dal calcolo del rischio sismico secondo le metodologie descritte nel capitolo 2.

Il seguente capitolo viene diviso in due paragrafi. Nel primo viene mostrato graficamente per un monumento le fasi di processing che hanno portato alla stima del rischio sismico, considerando le tre curve di fragilità utilizzate. Le restanti curve di pericolosità calcolate per ogni sito e le rispettive curve di fragilità sono rappresentate in Appendice.

Mentre nel secondo paragrafo per ogni curva di fragilità viene fatta una rappresentazione in forma tabellare dei risultati conseguiti per il modello di pericolosità MPS04.

La rappresentazione dei risultati in forma tabellare permette di verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti e una volta superata questa verifica, essi possono essere utilizzati per poterli graficare nell'analisi di consistenza per la verifica dei modelli di pericolosità.

4.1. PRESENTAZIONE GRAFICA DELLE FASI DI PROCESSING

Le fasi di processing appena descritte per il modello di pericolosità MPS04 sono rappresentate graficamente in questo paragrafo, tenendo conto come esempio il Tempio C di Selinunte.

Il Tempio C di Selinunte è un monumento greco di stile dorico che è stato danneggiato dal terremoto intorno al 40 d.C. Esso è costruito su un suolo di tipo C e quindi nella valutazione dell'Hazard è stato applicato l'approccio semplificativo di normativa sulla curva di pericolosità fornita dal modello MPS04 (fig.51)



Fig.51: Curve Hazard del Tempio C-di Selinunte. In particolare, in verde vi è la curva fornita da MPS04 su suolo A, in rosso la stessa ma calcolata su suolo C mediante l'approccio semplificativo di normativa.

L'aggiunta degli effetti di sito sulla curva di pericolosità è ben evidenziata nella figura 51 dal passaggio dei colori: dal rosso per la curva di pericolosità calcolata su suolo A, al verde per la curva di pericolosità calcolata su suolo C.

Successivamente la curva di Hazard, calcolata su suolo C, è stata resa equispaziata, grazie al metodo dell'interpolazione. Individuato sulla funzione di pericolosità il punto in cui l'andamento è più lineare, è stata fatta un'operazione di estrapolazione dei valori di accelerazione attese al suolo mediante il metodo della regressione lineare. Questa fase di processing ha permesso di calcolare una nuova funzione di pericolosità avente come valore massimo di accelerazione attesa al suolo pari a 4g (fig.52).



Fig.52: Operazioni sulla curva di Hazard. In alto in verde la funzione interpolata ed in blu il tratto in cui è stata fatta partire l'estrapolazione. In basso invece la nuova curva di Hazard estrapolata fino al valore di 4g.

Finito il lavoro di processing sulla curva di pericolosità, si è passati all'elaborazione delle funzioni di fragilità ottenute dai tre lavori di bibliografia descritti in precedenza.

In particolare, per i lavori di bibliografia di Pappas, Kavvadias, Papadoupolos saranno mostrati nelle figure 53-54-55 le rispettive funzioni di fragilità.

In particolare, saranno mostrate le funzioni di fragilità nella modalità in cui vengono utilizzati per il calcolo del rischio sismico: forma cumulata (CDF) per il metodo DCFD e nella sua derivata per il metodo dell'integrale.



Fig.53: Funzioni di fragilità Pappas numero 7 comparabile con il Tempio C di Selinunte. A sinistra essa è espressa come una curva di distribuzione di probabilità cumulata (CDF) e a destra la sua derivata è espressa come una curva di densità di probabilità.



Fig.54: Funzione di fragilità utilizzata per il Tempio C di Selinunte ottenuta dalla relazione empirica di collasso del lavoro di bibliografia di Papadoupolos. A sinistra essa è espressa come una curva di distribuzione di probabilità nella sua formula cumulata (CDF) e a destra la sua derivata è espressa come una curva di densità di probabilità.



Fig.55: Funzione di fragilità di Kavvadias comparabile per il Tempio C di Selinunte. A sinistra essa è espressa come una curva di distribuzione di probabilità nella sua formula cumulata (CDF) e a destra la sua derivata è espressa come una curva di densità di probabilità.

Ultimato il lavoro di processing riguardante la funzione di Hazard e di fragilità, infine si è passati alla stima del rischio sismico, per determinare così le probabilità di collasso per il monumento di Selinunte. Avendo a disposizione tre modelli di fragilità, sono stati ottenuti tre valori di probabilità di collasso per il tempio greco. In seguito nelle figure successive (da fig.56 a fig.61) verranno mostrati graficamente come è avvenuto il calcolo del rischio sismico considerando le curve di fragilità Pappas, Papadoupolos e Kavvadias. In particolare, per il metodo dell'integrazione (fig.56-58-60) vengono mostrate come avviene la convoluzione tra la funzione di pericolosità e derivata di fragilità. Mentre per il metodo DCFD (fig.57-59-61) si rappresenterà come è avvenuta la stima dei parametri necessari per applicare la formula chiusa (eq.18), considerando contemporaneamente la curva di pericolosità e la cumulata della funzione di fragilità.



Fig.56: Calcolo del rischio sismico per il tempio C di Selinunte, mediante l'integrazione tra la funzione di Hazard (verde) e la funzione di fragilità (rosso) di Pappas.





Fig.57: Calcolo del rischio sismico per il tempio C di Selinunte, mediante il metodo DCFD considerando la curva di fragilità di Pappas.



Fig.58: Calcolo del rischio sismico per il tempio C di Selinunte, mediante l'integrazione tra la funzione di Hazard (verde) e la funzione di fragilità (rosso) di Papadoupolos.





Fig.59: Calcolo del rischio sismico per il tempio C di Selinunte, mediante il metodo DCFD considerando la curva di fragilità di Papadoupolos.



Fig.60: Calcolo del rischio sismico per il tempio C di Selinunte, mediante l'integrazione tra la funzione di Hazard (verde) e la funzione di fragilità (rosso) di Kavvadias.





Fig.61: Calcolo del rischio sismico per il tempio C di Selinunte, mediante il metodo DCFD considerando la curva di fragilità di Kavvadias.

4.2. RAPPRESENTAZIONE DEI RISULTATI MEDIANTE TABELLE E COMMENTI

Nel paragrafo precedente sono state mostrate graficamente, prendendo come esempio il monumento di Selinunte, le varie operazioni effettuate che hanno portato al calcolo del rischio sismico.

Il parametro che si ricava attraverso le due metodologie di calcolo è il λ_{OT} : il tasso medio annuo di ribaltamento. Questo parametro viene inserito nel modello di Poisson per determinare la probabilità di collasso in un intervallo di tempo di 2500 anni e il periodo di ritorno ($T_r = 1/\lambda_{OT}$).

Calcolate le probabilità di collasso per tutti i monumenti considerando le curve di fragilità dei tre autori di bibliografia, si è succeduta la fase di verifica dei risultati ottenuti.

La verifica dei risultati è avvenuta applicando la relazione di disuguaglianza (eq.20), in cui i valori di λ_{OT} dovevano essere inferiori rispetto ad un valore limite ritenuto ammissibile. Per questa tipologia di strutture, dalla normativa si è ricavato un valore limite λ_0 pari a 4.00 × 10⁻⁴. In base alla conoscenza se il monumento presenta danni da terremoto è possibile stabilire se le stime effettuate siano attendibili o meno.

Di seguito nelle tabelle 10-11-12 verranno riportati i risultati ottenuti per il modello MPS04 considerando le funzioni di fragilità di bibliografia di Pappas, Kavvadias e Papadoupolos.

In particolare, le tabelle contengono le seguenti informazioni:

- Nome del monumento
- Tipologia di suolo su cui essi poggiano.
- Curva di bibliografia considerata
- Presenza del tipo di danno da terremoto
- Il tasso medio annuo di ribaltamento λ_{OT} , calcolato sia con il metodo dell'integrazione e sia con il metodo DCFD
- Periodo di ritorno T_r considerando
- Probabilità di collasso del monumento calcolato con una finestra temporale di 2500 anni, usando il parametro λ_{OT} ottenuto dalle due metodologie di calcolo.
- Verifica attendibilità dei risultati.

Monumento	Tipologia di Suolo	Curva di fragilità	Danni da terremoto	λ_{OT}	T _r	$P(C \lambda_{OT}, 2500)$	$\lambda_{OT (DCFD)}$	$T_{r(DCFD)}$	$P(C \lambda_{l(DCFD)}, 2500)$	$\lambda_{OT} \leq \lambda_0$	$\lambda_{OT(DCFD)} \leq \lambda_0$
Tempio Nettuno (Paestum- Campania)	Suolo C	Pappas- n°1- Suolo C	No	1.36 × 10 ⁻⁵	73394 anni	3.34 %	1.36 × 10 ⁻⁵	72599 anni	3.35%	Si	Si
Tempio Concordia- (Agrigento- Sicilia)	Suolo C	Pappas- n°5- Suolo C	No	8.26 × 10 ⁻⁶	12095 anni	2.04%	8.26 × 10 ⁻⁶	12095 anni	2.05%	Si	Si
Tempio C- (Selinunte- Sicilia)	Suolo C	Pappas- n°7- Suolo C	SI	1.02 × 10 ⁻⁴	9794 anni	22.52%	1.02 × 10 ⁻⁴	9794 anni	22.52%	Si	Si
Tempio di Hera Lacinia- (Capo Colonna- Crotone)	Suolo C	Pappas- n°7- Suolo C	SI	3.56 × 10 ⁻⁵	28031 anni	8.53%	3.56 × 10 ⁻⁵	2803 anni	8.53%	Si	Si
Tempio Poseidone- (Taranto-Puglia)	Suolo B	Pappas- n°7- Suolo B*	No	6.70 × 10 ⁻⁶	149120 anni	1.66%	6.70 × 10 ⁻⁶	156020 anni	1.66%	Si	Si

Tempio di Hera- (Metaponto- Basilicata)	Suolo B	Pappas- n°5- Suolo C*	No	8.82 × 10 ⁻⁵	11325 anni	19.81%	8.87 × 10 ⁻⁵	11271 anni	19.89%	Si	Si
Porticato romano (La Cuma-Marche)	Suolo B	Pappas- n°5- Suolo B*	No	5.86 × 10 ⁻⁴	1704 anni	76.94%	5.96 × 10 ⁻⁴	1675 anni	77.51%	No	No
Colonne San Lorenzo- (Milano- Lombardia)	Suolo C	Pappas- n°1- Suolo C	No	1.32 × 10 ⁻⁶	754110 anni	0.33%	1.32 × 10 ⁻⁶	754110 anni	0.33%	Si	Si
Capitolium romano- (Brescia- Lombardia)	Suolo C	Pappas- n°1- Suolo C	No	1.79 × 10 ⁻⁴	5575 anni	36.14%	1.79 × 10 ⁻⁴	5573 anni	36.14%	Si	Si
Basilica Romana (Sepino-Molise)	Suolo B	Pappas- n°5- Suolo B*	Si	1.70 × 10 ⁻³	600 anni	98.45%	1.80 × 10 ⁻³	563 anni	98.82%	No	No
Foro Romano (Aquileia-Friuli- Venezia-Giulia)	Suolo C	Pappas- n°2- Suolo C	No	2.04 × 10 ⁻⁴	4886 anni	40.04%	2.05 × 10 ⁻⁴	4859 anni	40.22%	Si	Si

Foro Romano (Velleia-Emilia- Romagna)	Suolo C	Pappas- n°4- Suolo C	No	5.55 × 10 ⁻⁵	17993 anni	12.97%	5.55 × 10 ⁻⁵	17991 anni	12.97%	Si	Si
Tempio di Segesta- (Calatafimi- Sicilia)	Suolo A	Pappas- n°7- Suolo A*	No	2.35 × 10 ⁻⁵	42437 anni	5.72%	2.35 × 10 ⁻⁵	42016 anni	5.72%	Si	Si
Tempio di Apollo- (Siracusa- Sicilia)	Suolo A	Pappas- n°4- Suolo A	No	4.75 × 10 ⁻⁴	2101 anni	69.57%	4.80×10^{-4}	2082 anni	69.89%	Si	Si

Tab.10: Tabella riepilogativa dei parametri per tutti i monumenti della tesi considerando la funzione di fragilità di Pappas, considerando il modello di pericolosità MPS04.

Monumento	Tipologia di Suolo	Curva di fragilità	Danni da terremoto	λ_{OT}	T _r	$P(C \lambda_{OT}, 2500)$	$\lambda_{OT (DCFD)}$	$T_{r(DCFD)}$	$P(C \lambda_{l(DCFD)}, 2500)$	$\lambda_{OT} \leq \lambda_0$	$\lambda_{OT(DCFD)} \leq \lambda_0$
Tempio Nettuno (Paestum- Campania)	Suolo C	Kavv	No	1.43 × 10 ⁻⁶	697030 anni	0.36%	1.69 × 10 ⁻⁶	590327 anni	0.42%	Si	Si
Tempio Concordia- (Agrigento- Sicilia)	Suolo C	Kavv	No	2.98 × 10 ⁻⁷	3351182 anni	0.07%	3.15 × 10 ⁻⁷	3175111 anni	0.08%	Si	Si

Tempio C- (Selinunte- Sicilia)	Suolo C	Kavv	SI	1.55 × 10 ⁻⁵	64455 anni	3.80%	1.60 × 10 ⁻⁵	62332 anni	3.93%	Si	Si
Tempio di Hera Lacinia- (Capo Colonna- Crotone)	Suolo C	Kavv	SI	6.90 × 10 ⁻⁶	144999 anni	1.71%	7.32 × 10 ⁻⁶	136662 anni	1.81%	Si	Si
Tempio Poseidone- (Taranto-Puglia)	Suolo B	Kavv	No	1.14 × 10 ⁻⁶	875525 anni	0.29%	1.18 × 10 ⁻⁶	846610 anni	0.29%	Si	Si
Tempio di Hera- (Metaponto- Basilicata)	Suolo B	Kavv	No	2.00 × 10 ⁻⁶	499086 anni	0.50%	2.31 × 10 ⁻⁶	432188 anni	0.58%	Si	Si
Porticato romano (La Cuma-Marche)	Suolo B	Kavv	No	1.45 × 10 ⁻⁵	68800 anni	3.57%	1.58 × 10 ⁻⁵	63262 anni	3.87%	Si	Si
Colonne San Lorenzo- (Milano- Lombardia)	Suolo C	Kavv	No	1.80 × 10 ⁻⁷	5543753 anni	0.05%	1.89 × 10 ⁻⁷	5294177 anni	0.05%	Si	Si

Capitolium romano- (Brescia- Lombardia) Basilica	Suolo C Suolo B	Kavv Kavv	No Si	1.41 × 10 ⁻⁵ 5.23	71157 anni 19135	3.45%	1.48 × 10 ⁻⁵	67540 anni 17375	3.63%	Si Si	Si Si
Romana (Sepino-Molise)				× 10 ⁻⁵	anni		× 10 ⁻⁵	anni			
Foro Romano (Aquileia-Friuli- Venezia-Giulia)	Suolo C	Kavv	No	5.12 × 10 ⁻⁶	195481 anni	1.27%	5.33 × 10 ⁻⁶	187501 anni	1.32%	Si	Si
Foro Romano (Velleia-Emilia- Romagna)	Suolo C	Kavv	No	7.48 × 10 ⁻⁶	133741 anni	1.85%	8.64 × 10 ⁻⁶	115699 anni	2.14%	Si	Si
Tempio di Segesta- (Calatafimi- Sicilia)	Suolo A	Kavv	No	2.38 × 10 ⁻⁶	420013 anni	0.59%	2.42 × 10 ⁻⁶	413730 anni	0.60%	Si	Si
Tempio di Apollo- (Siracusa- Sicilia)	Suolo A	Kavv	No	3.79 × 10 ⁻⁵	26384 anni	9.04%	3.91 × 10 ⁻⁵	25586 anni	9.31%	Si	Si

Tab.11: Tabella riepilogativa dei parametri per tutti i monumenti della tesi considerando la funzione di fragilità di Kavvadias, considerando il modello di pericolosità MPS04.

Monumento	Tipologia di Suolo	Curva di fragilità	Danni da terremoto	λ_{OT}	T _r	$P(C \lambda_{OT}, 2500)$	$\lambda_{OT (DCFD)}$	$T_{r(DCFD)}$	$P(C \lambda_{l(DCFD)}, 2500)$	$\begin{array}{l} \lambda_{OT} \\ \leq \lambda_0 \end{array}$	$\lambda_{OT(DCFD)} \leq \lambda_0$
Tempio Nettuno (Paestum- Campania)	Suolo C	Papad.	No	6.65 × 10 ⁻⁴	1503 anni	81.04%	2.82 × 10 ⁻¹	4 anni	100%	No	No
Tempio Concordia- (Agrigento- Sicilia)	Suolo C	Papad.	No	7.10 × 10 ⁻⁴	1408 anni	83.05%	2.14 × 10 ⁻²	47 anni	100%	No	No
Tempio C- (Selinunte- Sicilia)	Suolo C	Papad.	SI	1.84 × 10 ⁻³	543 anni	98.99%	1.72 × 10 ⁻²	58 anni	100%	No	No
Tempio di Hera Lacinia- (Capo Colonna- Crotone)	Suolo C	Papad.	SI	1.63 × 10 ⁻³	612 anni	98.31%	5.90 × 10 ⁻²	17 anni	100%	No	No
Tempio Poseidone- (Taranto-Puglia)	Suolo B	Papad.	No	8.65 × 10 ⁻⁴	1156 anni	88.49%	3.07 × 10 ⁻²	33 anni	100%	No	No
Tempio di Hera- (Metaponto- Basilicata)	Suolo B	Papad.	No	1.08 × 10 ⁻³	926 anni	93.27%	3.31 × 10 ⁺⁷	0 anni	100%	No	No
Porticato romano (La Cuma- Marche)	Suolo B	Papad.	No	1.71 × 10 ⁻³	585 anni	98.60%	7.55 × 10 ⁺²	0 anni	100%	No	No

Colonne San Lorenzo-(Milano- Lombardia)	Suolo C	Papad.	No	9.12 × 10 ⁻⁴	1097 anni	89.76%	1.64×10^{-1}	6 anni	100%	No	No
Capitolium romano-(Brescia- Lombardia)	Suolo C	Papad.	No	2.48 × 10 ⁻³	403 anni	99.79%	1.81 × 10 ⁻¹	6 anni	100%	No	No
Basilica Romana (Sepino-Molise)	Suolo B	Papad.	Si	1.86 × 10 ⁻³	538 anni	99.04%	4.36 × 10 ⁺²	0 anni	100%	No	No
Foro Romano (Aquileia-Friuli- Venezia-Giulia)	Suolo C	Papad.	No	3.57 × 10 ⁻³	280 anni	99.98%	3.94 × 10 ⁻²	25 anni	100%	No	No
Foro Romano (Velleia-Emilia- Romagna)	Suolo C	Papad.	No	2.88 × 10 ⁻³	347 anni	99.92%	5.77 × 10 ⁻²	17 anni	100%	No	No
Tempio di Segesta- (Calatafimi- Sicilia)	Suolo A	Papad.	No	9.03 × 10 ⁻³	11079 anni	20.20%	1.72 × 10 ⁻⁴	8514 anni	25.44%	No	No
Tempio di Apollo-(Siracusa- Sicilia)	Suolo A	Papad.	No	6.45 × 10 ⁻⁴	1551 anni	88.49%	7.27 × 10 ⁻⁴	1375 anni	84%	No	No

Tab.12: Tabella riepilogativa dei parametri per tutti i monumenti della tesi considerando la funzione di fragilità di Pappas, considerando il modello di pericolosità MPS04.

Dalle tabelle sopra elencate è possibile dedurre che i risultati dipendono fortemente dalla scelta della curva di fragilità di bibliografia e sono stati evidenziati in arancione i casi in cui i risultati non verificano la diseguaglianza d'attendibilità (eq.20). In particolare, considerando la curva di bibliografia di Pappas, per i monumenti che non hanno subito danni da terremoto, si è potuto osservare che i risultati verificano la condizione di attendibilità. Ossia che i valori del numero di perdite atteso sia inferiore rispetto al valore limite ritenuto ammissibile. L'unico monumento, tra quelli che non hanno subito danni da terremoto, in cui non si verifica questa condizione d'attendibilità, evidenziato in arancione, è il porticato romano di La Cuma. Come si evince dalla tabella i valori di λ_{OT} sono leggermente superiori al valore della soglia scelta. Avendo calcolato la curva di fragilità di bibliografia mediante l'approccio semplificativo di normativa, i valori ottenuti sono ancora accettabili per le nostre analisi di validità del modello di pericolosità MPS04.

Mentre per quanto riguarda i monumenti che hanno subito danni da terremoto: il Tempio C di Selinunte, il tempio di Hera di Crotone e la Basilica si sono osservati i seguenti risultati.

Per i due templi greci (Selinunte e Crotone) i valori di λ_{OT} sono inferiori al valore limite ritenuto ammissibile, e questo indica che i monumenti non avrebbero dovuto subire danni da terremoto. La possibile sottostima dipende dal fatto sia che la curva di fragilità non è quella specifica per i monumenti in questioni ma anche dal fatto che i monumenti sono localizzati in zone di bassa pericolosità.

Per quanto riguarda il monumento romano di Sepino in Molise, come si osserva dalla tabella i valori di λ_{OT} , calcolati con entrambe le metodologie, sono più grandi rispetto al valore limite λ_0 prestabilito. Essendo che il monumento ha subito danno dall'evento sismico del 346 d.C. ci aspettavamo che questa relazione non venisse rispettata. Ergo in base a queste osservazioni i risultati ottenuti risultano attendibili.

Invece considerando la curva di fragilità di Kavvadias calcolata per il monumento specifico di Siracusa e applicandola anche per gli altri monumenti della tesi attraverso l'analisi comparativa, si è visto che i risultati ottenuti sono inferiori rispetto al valore limite ritenuto
ammissibile. Quindi per questo modello di Fragilità i monumenti di Sepino, il tempio C di Selinunte e il Tempio di Hera di Crotone non trovano concordanza con il loro stato di conservazione e quindi non avrebbero dovuto subire danni dal terremoto. Questa forte sottostima, rendono la curva elaborata da Kavvadias poco attendibile. Infatti, l'autore di bibliografa, ha calcolato la funzione di fragilità per far sì che i monumenti non subiscono danni fino ad elevate valori di PGA (3.3 g).

In ultima analisi, per quanto riguarda le funzioni di fragilità ottenute dalla relazione empirica di collasso di Papadoupolos è possibile osservare che tutti i valori siano molto superiori rispetto al valore limite ritenuto ammissibile. I risultati ottenuti non risultano essere attendibili, poiché la funzione di fragilità di Papadoupolos, è stata calcolata risolvendo un'equazione empirica di collasso di natura conservativa, per un set di accelerogrammi. Quindi la curva di fragilità ottenuta è una funzione molto conservativa, dove i valori di accelerazione attesi forniti dal modello di pericolosità per i siti dei monumenti, avrebbero dovuto causare a loro danni da terremoto.

Una volta accertata la validità dei risultati, essi saranno poi discussi e rappresentati nell'analisi di consistenza per la validità del modello MPS04.

CAPITOLO 5

ANALISI DEI RISULTATI PER SHARE-TABELLE E DISCUSSIONI

In questo capitolo verrà descritto come il calcolo del rischio sismico, secondo le due metodologie e le relative probabilità di collasso sia stato effettuato considerando i dati di pericolosità del modello europeo SHARE.

Il codice di elaborazione dei dati su Matlab per la valutazione del rischio è simile a quello utilizzato per il modello MPS04, ma differisce leggermente nella fase di processing riguardante la definizione della curva di pericolosità sismica. In particolare, i dati scaricati dal modello SHARE esprimono la pericolosità sismica in termini di (POE=Probabilità di Eccedenza), mentre MPS04 in frequenza annuale di superamento rispetto ai valori di accelerazione attese al suolo. Quindi note le probabilità di eccedenza, per esprimere la curva di Hazard in termini di PGA- λ (frequenza annuale di superamento), è stata applicata la seguente relazione:

$$\lambda_{Poisson} = \frac{-\log(1 - Poe)}{\tau_{window}} \quad (33)$$

Dove τ_{window} è l'intervallo di tempo utilizzato su cui sono state fatte le stime di pericolosità. Come intervallo di tempo è stato scelto quello di 50 anni.

Anche per il modello SHARE i valori di pericolosità sono stati calcolati in base alla tipologia di suolo A e quindi non tiene conto degli effetti di sito. Dunque, anche per il modello di pericolosità europeo è stato necessario utilizzare l'approccio semplificativo di normativa, per le curve di pericolosità dei siti dei monumenti avente un suolo diverso da quello di tipo A.

Infine, una volta aver definito la funzione di pericolosità in termini di frequenza annuale di superamento sulla specifica categoria di suolo, essa

è stata equispaziata nei valori mediante l'operazione d'interpolazione lineare.

Rispetto a MPS04 non è stato fatto un lavoro di estrapolazione dei dati, attraverso la regressione lineare, poiché i dati forniti dal modello contengono già alti valori di PGA (valore massimo ottenuto dal modello 3.45 g).

Avendo già mostrato nel capitolo precedente le curve di fragilità utilizzate e la descrizione grafica per il calcolo del rischio sismico con entrambe le metodologie, mi limiterò a mostrare qui soltanto un esempio delle fasi di processing sulla curva di pericolosità fornite da SHARE, per il tempio C di Selinunte. Mentre sempre in Appendice, saranno rappresentati per ogni sito le rispettive curve di pericolosità e le curve fragilità di bibliografia.

In particolare, nella figura 62 verrà mostrata la curva di pericolosità espressa in termini di **PoE-PGA** scaricata dalla libreria dati del modello di pericolosità SHARE.



Fig.62: *Curva Hazard espressa in termini di probabilità di eccedenza (PoE)-PGA, per il tempio C di Selinunte (Sicilia).*

Successivamente mediante la relazione 35 è stato possibile ricalcolare la funzione di hazard in termini di λ (frequenza di superamento) e PGA. Infine, la nuova funzione di pericolosità è stata ricalcolata su suolo C mediante l'approccio semplificativo di normativa. Le seguenti operazioni sono mostrate dalle figure 63 e 64.



Fig.63: *Curva Hazard espressa in termini di frequenza di superamento-PGA, per il tempio C di Selinunte (Sicilia).*



Fig.64: Applicazione approccio semplificativo di normativa. In rosso vi è l'Hazard calcolato su suolo A dal modello di pericolosità (SHARE), in verde la stessa ma calcolata su suolo C.

Come si nota dalla figura 64, l'aggiunta del contributo degli effetti di sito, mediante l'approccio semplificativo di normativa, sulla curva di pericolosità fornita dal modello di pericolosità SHARE, è data dalla funzione di colore verde.

La nuova funzione di Hazard, resa equispaziata attraverso il metodo dell'interpolazione lineare, è stata, infine, poi utilizzata insieme alle funzioni di fragilità di bibliografia di Pappas, Kavvadias e Papadoupolos, per calcolare il rischio sismico mediante le due tipologie di calcolo.

Dunque, considerando tutte le curve di fragilità disponibili, per ogni monumento si sono ottenute tre valori del parametro λ_{OT} a seconda della metodologia di calcolo utilizzata. Infine, i parametri λ_{OT} sono stati inseriti nel modello di Poisson, ottenendo così i periodi di ritorno e le probabilità di collasso specifiche per ogni monumento considerato.

Come per il modello di pericolosità MPS04, i seguenti risultati sono stati testati per verificare la loro attendibilità.

La verifica dei risultati è stata fatta considerando il parametro λ_{OT} , ottenuto sia con il metodo dell'integrazione e sia con il metodo DCFD, in cui esso doveva essere inferiore ad un valore limite ritenuto ammissibile λ_0 pari a 4.00 × 10⁻⁴.

Una volta accreditata l'attendibilità dei risultati, essi sono stati utilizzati nell'analisi di consistenza e comparativa per testare la validità del modello di pericolosità SHARE.

Di seguito tutti i parametri appena descritti e i risultati della verifica dei risultati, per ogni curva di fragilità della bibliografia considerati sono mostrate dalle tabelle 13-14-15.

Monumento	Tipolo gia di Suolo	Curva di fragilità	Danni da terremoto	λ_{OT}	T _r	$P(C \lambda_{OT}, 2500)$	$\lambda_{OT (DCFD)}$	$T_{r(DCFD)}$	$P(C \lambda_{OT (DCFD)}, 2500)$	$\lambda_{OT} \le \lambda_0$	$\lambda_{OT (DCFD)} \leq \lambda_0$
Tempio Nettuno (Paestum- Campania)	Suolo C	Pappas- n°1- Suolo C	No	3.06 × 10 ⁻⁴	3260 anni	53.55%	3.45 × 10 ⁻⁴	2890 anni	57.86%	Si	Si
Tempio Concordia- (Agrigento- Sicilia)	Suolo C	Pappas- n°5- Suolo C	No	2.56 × 10 ⁻⁴	3903 anni	47.30%	2.76 × 10 ⁻⁴	3621 anni	49.85%	Si	Si
Tempio C- (Selinunte- Sicilia)	Suolo C	Pappas- n°7- Suolo C	SI	1.55 × 10 ⁻⁴	6411 anni	32.29%	1.56 × 10 ⁻⁴	6399 anni	32.34%	Si	Si
Tempio di Hera Lacinia (Capo Colonna- Crotone)	Suolo C	Pappas- n°7- Suolo C	SI	4.09 × 10 ⁻⁴	2444 anni	64.03%	4.10×10^{-4}	2437 anni	64.14%	Si	Si
Tempio Poseidone- (Taranto- Puglia)	Suolo B	Pappas- n°7- Suolo B*	No	1.38 × 10 ⁻⁴	7242 anni	29.19%	1.38 × 10 ⁻⁴	7209 anni	29.30%	Si	Si

Tempio di	Suolo	Pappas-	No	7.56	1322	84.90%	7.68	1301	85.36%	No	No
Hera-	С	n°5-		$\times 10^{-4}$	anni		$ imes 10^{-4}$	anni			
(Metaponto-		Suolo C*									
Basilicata)											
Porticato	Suolo	Pappas-	No	1.10	899	93.80%	1.10	874	94.25%	No	No
romano (La	В	n°5-		$\times 10^{-3}$	anni		$\times 10^{-3}$	anni			
Cuma-Marche)		Suolo B*									
Colonne San	Suolo	Pappas-	No	1.15	8684	25.01%	1.25	7978	26.89%	Si	Si
Lorenzo-	В	n°1-		$\times 10^{-4}$	anni		$ imes 10^{-4}$	anni			
(Milano-		Suolo C									
Lombardia)											
Capitolium	Suolo	Pappas-	No	4.80	2083	69.88%	4.87	2049	70.46%	No	No
romano-	С	n°1-		$\times 10^{-4}$	anni		$\times 10^{-4}$	anni			
(Brescia-		Suolo C									
Lombardia)											
Basilica	Suolo	Pappas-	Si	2.60	390	99.83%	2.80	353	99.91%	No	No
Romana	С	n°5-		$\times 10^{-3}$	anni		$\times 10^{-3}$	anni			
(Sepino-Molise)		Suolo B*									
Foro Romano	Suolo	Pappas-	No	5.49	1818	74.71%	5.56	1797	75.11%	No	No
(Aquileia-	В	n°2-		$\times 10^{-4}$	anni		$\times 10^{-4}$	anni			
Friuli-Venezia-		Suolo C									
Giulia)											

Foro Romano	Suolo	Pappas-	No	5.06	1975	71.80%	5.17	1932	72.58%	No	No
(Velleia-Emilia-	С	n°4-		$\times 10^{-4}$	anni		$ imes 10^{-4}$	anni			
Romagna)		Suolo C									
Tempio di	Suolo	Pappas-	No	1.99	5005	39.31%	2.00	4980	39.46%	Si	Si
Segesta-	А	n°7-		$\times 10^{-4}$	anni		$\times 10^{-6}$	anni			
(Calatafimi-		Suolo A*									
Sicilia)											
Tempio di	Suolo	Pappas-	No							No	No
Apollo-	А	n°4-		6.12	1633	78 260/	6.63	1506	<u>80 080/</u>		
(Siracusa-		Suolo A		$\times 10^{-4}$	anni	/8.30/0	$ imes 10^{-4}$	anni	80.9870		
Sicilia)											

Tab.13: Tabella riepilogativa dei parametri per tutti i monumenti della tesi considerando la funzione di fragilità di Pappas, considerando il modello di pericolosità SHARE.

Monumento	Tipologia Suolo	di Curva fragilità	di Danni da terremoto	λ_{OT}	T_r	$P(C \lambda_{OT}, 2500)$	$\lambda_{OT (DCFD)}$	$T_{r(DCFD)}$	$P(C \lambda_{l(DCFD)}, 2500)$	$\lambda_{OT} < \lambda_{CT}$	$\lambda_{OT(DCFD)}$
Tempio Nettuno (Paestum- Campania)	Suolo C	Kavv	No	1.97 × 10 ⁻⁵	50653 anni	4.82%	1.79 × 10 ⁻³	558 anni	98.86%	Si	No
Tempio Concordia- (Agrigento- Sicilia)	Suolo C	Kavv	No	9.76 × 10 ⁻⁶	102410 anni	2.41%	3.61 × 10 ⁺⁶	0 anni	100%	Si	No
Tempio C- (Selinunte- Sicilia)	Suolo C	Kavv	SI	2.18 × 10 ⁻⁵	45871 anni	5.30%	3.58 × 10 ⁺¹²	0	100%	Si	No
Tempio di Hera Lacinia- (Capo Colonna- Crotone)	Suolo C	Kavv	SI	5.23 × 10 ⁻⁵	19114 anni	12.26%	2.00 × 10 ⁻²	50 anni	100%	Si	No
Tempio Poseidone- (Taranto- Puglia)	Suolo B	Kavv	No	1.97 × 10 ⁻⁵	50653 anni	4.82%	1.79 × 10 ⁻³	558 anni	98.86%	Si	No
Tempio di Hera- (Metaponto- Basilicata)	Suolo B	Kavv	No	1.97 × 10 ⁻⁵	50879 anni	4.79%	7.82 × 10 ⁻⁶	127936 anni	1.94%	Si	No

Porticato romano (La	Suolo B	Kavv	No	3.12 × 10 ⁻⁵	32081 anni	7.50%	3.97 × 10 ⁺⁹	0	100%	Si	No
Cuma- Marche)											
Colonne San Lorenzo- (Milano- Lombardia)	Suolo C	Kavv	No	7.54 × 10 ⁻⁶	132711 anni	1.87%	1.78 × 10 ⁺⁶	0	100%	Si	No
Capitolium romano- (Brescia- Lombardia)	Suolo C	Kavv	No	3.51 × 10 ⁻⁵	28497 anni	8.40%	1.86 × 10 ⁺⁶	0	100%	Si	No
Basilica Romana (Sepino- Molise)	Suolo B	Kavv	Si	6.57 × 10 ⁻⁵	15209 anni	15.16%	5.43 × 10 ⁺³	0	100%	Si	No
Foro Romano (Aquileia- Friuli- Venezia- Giulia)	Suolo C	Kavv	No	1.33 × 10 ⁻⁵	75400 anni	3.26%	6.20 × 10 ⁺²	0	100%	Si	No
Foro Romano (Velleia- Emilia- Romagna)	Suolo C	Kavv	No	2.88 × 10 ⁻⁵	34761 anni	6.94%	1.92 × 10 ⁺⁶	0	100%	Si	No

Tempio d	i Suolo A	Kavv	No	1.49	67040	3.66%	2.29	0	100%	Si	No
Segesta-				$\times 10^{-5}$	anni		$\times 10^{+26}$				
(Calatafimi-											
Sicilia)											
Tempio d	i Suolo A	Kavv.	No	3.25			3.61	272	99.99%	Si	No
Apollo-				$\times 10^{-5}$	30735	7 910/	$\times 10^{-3}$	anni			
(Siracusa-					anni	7.0170					
Sicilia)											

Tab.14: Tabella riepilogativa dei parametri per tutti i monumenti della tesi considerando la funzione di fragilità di Kavvadias, considerando il modello di pericolosità SHARE.

Monumento	Tipologia	Curva di	Danni da	λ_{OT}	T_r	$P(C \lambda_{OT}, 2500)$	$\lambda_{OT (DCFD)}$	$T_{r(DCFD)}$	$P(C \lambda_{l(DCFD)}, 2500)$	λ_{OT}	$\lambda_{OT(DCFD)}$
	di Suolo	fragilità	terremoto							$\leq \lambda_0$	$\leq \lambda_0$
Tempio	Suolo C	Papad.	No	3.09×10^{-3}	323	99.95%	4.67	2 anni	100%	No	No
Nettuno					anni		$\times 10^{-1}$				
(Paestum-											
Campania)											
Tempio	Suolo C	Papad.	No	3.10×10^{-3}	322	99.95%	2.06	49 anni	100%	No	No
Concordia-					anni		$\times 10^{-2}$				
(Agrigento-											
Sicilia)											
Tempio C-	Suolo C	Papad.	SI	3.71×10^{-3}	323	99.99%	1.33	36 anni	100%	No	No
(Selinunte-					anni		$\times 10^{-1}$				
Sicilia)											

Tempio di	Suolo C	Papad.	SI	7.77×10^{-3}	129	100%	1.06	94 anni	100%	No	No
Hera Lacinia-					anni		$\times 10^{-2}$				
(Capo											
Colonna-											
Crotone)											
Tempio	Suolo B	Papad.	No	4.25×10^{-3}	235	99.99%	9.50	11 anni	100%	No	No
Poseidone-					anni		$\times 10^{-2}$				
(Taranto-											
Puglia)											
Tempio di	Suolo B	Papad.	No	9.73×10^{-3}	103	100%	2.65	0 anni	100%	No	No
Hera-					anni		$\times 10^{+8}$				
(Metaponto-											
Basilicata)											
Porticato	Suolo B	Papad.	No	1.20×10^{-2}	84	100%	1.29	0 anni	100%	No	No
romano (La					anni		$\times 10^{+5}$				
Cuma-											
Marche)											
Colonne San	Suolo C	Papad.	No	3.57×10^{-3}	280	99.98%	9.00	111	100%	No	No
Lorenzo-		_			anni		$\times 10^{-1}$	anni			
(Milano-											
Lombardia)											
Capitolium	Suolo C	Papad.	No	8.68×10^{-3}	115	100%	3.60	28 anni	100%	No	No
romano-					anni		$\times 10^{-2}$				
(Brescia-											
Lombardia)											

Basilica Romana (Sepino- Molise)	Suolo B	Papad.	Si	1.30×10^{-2}	77 anni	100%	4.02 × 10 ⁺¹¹	0 anni	100%	No	No
Foro Romano (Aquileia- Friuli- Venezia- Giulia)	Suolo C	Papad.	No	1.05×10^{-2}	96 anni	100%	2.58 × 10 ⁻²	39 anni	100%	No	No
Foro Romano (Velleia- Emilia- Romagna)	Suolo C	Papad.	No	6.00×10^{-3}	167 anni	100%	7.42 × 10 ⁻²	135 anni	100%	No	No
Tempio di Segesta- (Calatafimi- Sicilia)	Suolo A	Papad.	No	4.03×10^{-4}	2482 anni	63.47%	2.77 × 10 ⁻²	36 anni	100%	No	No
Tempio di Apollo- (Siracusa- Sicilia)	Suolo A	Papad.	No	8.30×10^{-4}	1204 anni	87.45%	3.13 × 10 ⁻³	319 anni	99.96%	No	No

Tab.15: Tabella riepilogativa dei parametri per tutti i monumenti della tesi considerando la funzione di fragilità di Papadoupolos, considerando il modello di pericolosità SHARE

I risultati conseguiti presentati dalle tabelle sopra elencate, considerando il modello di pericolosità SHARE e le curve di fragilità degli autori di bibliografia, ha permesso di dedurre le seguenti considerazioni.

Il modello di pericolosità SHARE fornisce dei valori di pericolosità più alti rispetto al modello italiano MPS04 e questo si riflette anche nella determinazione dei parametri ottenuti dalle metodologie di calcolo del rischio sismico.

In merito a questo, le analisi considerate per le curve di fragilità di Pappas, Kavvadias e Papadoupolos hanno portato ai seguenti risultati.

Per quanto riguarda la curva di Pappas, si osserva che per alcuni monumenti che non hanno subito danni da terremoto anche se i valori di λ_{OT} sono più grandi rispetto a MPS04 essi sono comunque inferiori rispetto al valore limite λ_0 ritemuto ammissibile, attestando la validità dei risultati.

Mentre ci sono alcuni monumenti che non hanno subito danni da terremoto come: il Tempio di Hera (Basilicata), Porticato romano (La Cuma-Marche), Tempio Capitolino (Brescia), Foro Romano Aquileia (Friuli-Venezia-Giulia), Foro romano Velleia-(Emilia-Romagna) e il Tempio di Apollo-(Siracusa-Sicilia) i cui valori di λ_{OT} , evidenziati in arancione in tabella, sono superiori al valore di soglia λ_0 . Seppur i valori eccedono il valore limite ritenuto ammissibile, i risultati sono stati comunque considerati idonei per la verifica dell'attendibilità del modello di pericolosità. Questo perché i valori di pericolosità, ottenuti da SHARE, sono più grandi rispetto a MPS04 e la curva di fragilità di bibliografia di Pappas è stata adattata al tipo di suolo dei monumenti, mediante l'approccio semplificativo di normativa.

In merito invece ai monumenti che hanno subito danni da terremoto come il Tempio C di Selinunte, il Tempio di Hera di Crotone e la Basilica Romana a Sepino le analisi hanno prodotto i seguenti risultati.

Per il monumento di Sepino, i valori di λ_{OT} sono maggiori rispetto al valore soglia λ_0 , come evidenziato in arancione. Essendo che il monumento di Sepino ha subito danni dall'evento del 346 d.C, i risultati risultano attendibili. Mentre per i monumenti di Selinunte e Crotone, seppur i valori sono più grandi rispetto a MPS04, i risultati sono comunque inferiori al valore limite. Dunque, per questi monumenti gli esiti non sono in accordo con le evidenze di collasso delle strutture, presupponendo che i monumenti non avrebbero dovuto subire danni da terremoto. Per quanto riguarda invece i risultati ottenuti considerando la curva di bibliografia di Kavvadias, si evince che i risultati ottenuti calcolati con il metodo DCFD sono molto più grandi rispetto a quelli ottenuti con il metodo dell'integrazione. Questa sovrastima dei risultati ottenuti con la metodologia DCFD è dipesa da due fattori. Dalla pendenza della curva di pericolosità molto pronunciata per alti valori di pericolosità e dal fatto che la mediana della curva di fragilità di Kavvadias (3.3 g) è localizzata in quel tratto di pendenza. Questo è uno dei casi particolari in cui il metodo DCFD risulta non funzionare bene.

Considerando quindi solo i valori di rischio ottenuti soltanto con il metodo dell'integrazione si notano i seguenti risultati. Per questo modello di fragilità, infatti, si osserva che tutti i valori di λ_{OT} , calcolati per ogni monumento, sono minori rispetto al valore limite di soglia λ_0 . Questi risultati comportano che i monumenti che hanno subito danni da terremoto come Selinunte, Crotone e Sepino dovevano resistere agli eventi sismici che hanno causato la loro distruzione totale o parziale.

I valori ottenuti utilizzando la curva di fragilità di Kavvadias, quindi sottostimano molto il comportamento strutturale dei monumenti ritenendo i risultati poco attendibili. La sottostima dei risultati è dipesa dal momento che questa funzione di fragilità, sono meno cautelativi, ossia fanno sì che i monumenti resistono per alti valori di PGA.

Infine, in merito ai risultati ottenuti con la curva di Papadoupolos, curva ottenuta risolvendo la relazione empirica di collasso con un set di accelerogrammi, si osserva che tutti i valori del rischio, calcolate con entrambe le metodologie, siano molto superiori rispetto al valore limite ritenuto ammissibile. Da questa considerazione è possibile dedurre che i risultati conseguiti considerando il modello di fragilità di Papadoupolos non sono molto attendibili, poiché tutti i monumenti avrebbero dovuto subire danni da terremoto. La mancata concordanza tra le evidenze di danno e i risultati ottenuti è dovuto al fatto che la curva di fragilità di Papadoupolos è molto conservativa.

CAPITOLO 6

ANALISI DEI RISULTATI PER MPS19-TABELLE E DISCUSSIONI

In quest'ultimo capitolo di analisi, verrà descritto come il calcolo del rischio sismico, secondo le due metodologie e le relative probabilità di collasso sia stato effettuato considerando i dati di pericolosità del nuovo modello di pericolosità italiano MPS19.

Il codice di elaborazione dei dati su Matlab per la valutazione del rischio è simile a quello utilizzato già per gli altri due modelli di pericolosità, ma differisce leggermente nella fase di processing riguardante la definizione della curva di pericolosità sismica. In particolare, la matrice dei valori di pericolosità per il modello MPS19, esprime le funzioni di pericolosità in termini di (POE=Probabilità di Eccedenza), proprio come SHARE. Quindi note le probabilità di eccedenza, per esprimere la curva di Hazard in termini di PGA- λ (frequenza annuale di superamento), è stata applicata di nuovo la relazione 33 riproponendola qui nuovamente:

$$\lambda_{Poisson} = \frac{-\log(1 - Poe)}{\tau_{window}} \quad (33)$$

Essendo che le probabilità di eccedenza sono già state calcolate su un intervallo di tempo di 1 anno, il parametro τ_{window} da sostituire nell'equazione 33 per ricavare la frequenza di superamento è pari a 1.

Per il modello MPS19, i valori di pericolosità sono stati già calcolati in base alla tipologia di suolo specifico per i monumenti, tenendo quindi conto degli effetti d'amplificazione di sito. Dunque, per questo modello di pericolosità non è stato necessario utilizzare l'approccio semplificativo di normativa, per calcolare le curve di pericolosità su un suolo diverso da quello di tipo A.

Successivamente, dopo aver definito le funzioni di pericolosità in termini di frequenza annuale di superamento per tutti i monumenti, esse sono state ricampionate con un passo costante nei valori, mediante l'operazione d'interpolazione lineare.

Anche per MPS19 come con SHARE non è stato necessario effettuare un lavoro di estrapolazione dei dati, come con MPS04 attraverso una

regressione lineare, poiché i dati di pericolosità del modello sono calcolati considerando alti valori di PGA (valore massimo ottenuto dal modello 5 g). Anche in questo capitolo, avendo già mostrato precedentemente le curve di fragilità scelte dalla bibliografia e la descrizione grafica per il calcolo del rischio sismico con entrambe le metodologie, mi limiterò a mostrare soltanto le fasi di processing sulla curva di pericolosità fornite da MPS19, per il tempio C di Selinunte. Di seguito sempre in Appendice, verranno rappresentate per ogni sito le curve di pericolosità per ogni modello di pericolosità considerato e le curve di fragilità considerate per le nostre analisi.

In particolare, nella figura 65 verrà mostrata la curva di pericolosità espressa in termini di **PoE-PGA** per il modello MPS19.



Fig.65: *Curva Hazard espressa in termini di probabilità di eccedenza* (*PoE*)-*PGA, per il tempio C di Selinunte (Sicilia*).

Dopo di che utilizzando di nuovo la relazione 33 è stato possibile esprimere la funzione di hazard in termini di λ (frequenza di superamento) -PGA. Infine, la nuova funzione di pericolosità già calcolata su suolo C è mostrata dalla figura 66.



Fig.66: Curva Hazard espressa in termini di frequenza di superamento-PGA, per il tempio C di Selinunte (Sicilia).

Dopo aver determinato la nuova funzione di Hazard, essa è stata resa omogenea nell'intervallo di campionamento attraverso il metodo dell'interpolazione lineare. Questa, successivamente, è stata utilizzata insieme alle funzioni di fragilità di bibliografia di Pappas, Kavvadias e Papadoupolos, per calcolare il rischio sismico mediante le due tipologie di calcolo.

Infine, i parametri λ_{OT} sono stati inseriti nel modello di Poisson, ottenendo così i periodi di ritorno e le probabilità di collasso specifiche per ogni monumento considerato.

I seguenti risultati sono stati sottoposti a verifica utilizzando la metodologia esposta nei capitoli precedentemente, e gli esiti di questi risultati ottenuti per ogni curva di fragilità della bibliografia considerati, sono mostrati dalle tabelle 16-17-18.

Accreditati la loro attendibilità, i seguenti risultati, mostrati nelle tabelle sottostanti, sono stati utilizzati nel capitolo successivo per verificare l'attendibilità del modello MPS19.

Monumento	Tipologia	Curva di	Danni da	λ_{OT}	T_r	$P(C \lambda_{OT}, 2500)$	$\lambda_{OT (DCFD)}$	$T_{r(DCFD)}$	$P(C \lambda_{OT (DCFD)}, 2500)$	λ_{OT}	$\lambda_{OT (DCFD)}$
	di Suolo	fragilità	terremoto							$\leq \lambda_0$	$\leq \lambda_0$
Tempio Nettuno	Suolo C	Pappas-	No	3.38	7713	57.07%	3.52	7316	58.54%	Si	Si
(Paestum-		n°1-		$\times 10^{-4}$	anni		$ imes 10^{-4}$	anni			
Campania)		Suolo C									
Tempio	Suolo C	Pappas-	No	3.75	2690	60.52%	3.86	2594	61.86%	Si	Si
Concordia-		n°5-		$\times 10^{-4}$	anni		$ imes 10^{-4}$	anni			
(Agrigento-		Suolo C									
Sicilia)											
Tempio C-	Suolo C	Pappas-	SI	1.54	6507	31.90%	1.54	6486	31.99%	Si	Si
(Selinunte-		n°7-		$\times 10^{-4}$	anni		$\times 10^{-4}$	anni			
Sicilia)		Suolo C									
Tempio di Hera	Suolo C	Pappas-	SI	1.92	5206	38.13%	1.93	5191	38.22%	Si	Si
Lacinia (Capo		n°7-		$\times 10^{-4}$	anni		$ imes 10^{-4}$	anni			
Colonna-		Suolo C									
Crotone)											
Tempio	Suolo B	Pappas-	No	7.75	12909	17.61%	7.78	12855	17.67%	Si	Si
Poseidone-		n°7-		$\times 10^{-5}$	anni		$ imes 10^{-5}$	anni			
(Taranto-Puglia)		Suolo B*									
Tempio di Hera-	Suolo C	Pappas-	No	3.05	3274	53.40%	3.19	3133	54.98%	Si	Si
(Metaponto-		n°5-		$\times 10^{-4}$	anni		$ imes 10^{-4}$	anni			
Basilicata)		Suolo C*									

Porticato	Suolo B	Pappas-	No	1.21	824	95.18%	1.27	785 anni		No	No
romano (La		n°5-		$\times 10^{-3}$	anni		$\times 10^{-3}$		95.86%		
Cuma-Marche)		Suolo B*									
Colonne San	Suolo B	Pappas-	No	1.30	7713	27.69%	1.37	7316		Si	Si
Lorenzo-		n°1-		$\times 10^{-4}$	anni		$\times 10^{-4}$	anni	29.050/		
(Milano-		Suolo C							28.9370		
Lombardia)											
Capitolium	Suolo C	Pappas-	No	7.16	1396	83.31%	7.51	1331		No	No
romano-		n°1-		$\times 10^{-4}$	anni		$ imes 10^{-4}$	anni	81 770/		
(Brescia-		Suolo C							04./2/0		
Lombardia)											
Basilica	Suolo C	Pappas-	Si	1.79	559	98.85%	1.86	537 anni		No	No
Romana		n°5-		$\times 10^{-3}$	anni		$\times 10^{-3}$		99.05%		
(Sepino-Molise)		Suolo B*									
Foro Romano	Suolo B	Pappas-	No	6.46	1548	80.12%	6.69	1494		No	No
(Aquileia-Friuli-		n°2-		$\times 10^{-4}$	anni		$\times 10^{-4}$	anni	81.23%		
Venezia-Giulia)		Suolo C									
Foro Romano	Suolo C	Pappas-	No	3.94	2541	62.61%	4.08	2452	63.92%	Si	No
(Velleia-Emilia-		n°4-		$\times 10^{-4}$	anni		$ imes 10^{-4}$	anni			
Romagna)		Suolo C									
Tempio di	Suolo A	Pappas-	No	6.28	15912	14.54%	6.30	15863	14.58%	Si	Si
Segesta-		n°7-		$\times 10^{-5}$	anni		$\times 10^{-5}$	anni			
(Calatafimi-		Suolo A*									
Sicilia)											

Tempio d	li Suolo A	Pappas-	No	1.91			1.96			Si	Si
Apollo-		n°4-		$\times 10^{-4}$	5223	28 040/	$\times 10^{-4}$	5096	20 77		
(Siracusa-		Suolo A			anni	38.04%		anni	38.//		
Sicilia)											

Tab.16: Tabella riepilogativa dei parametri per tutti i monumenti della tesi considerando la funzione di fragilità di Pappas, considerando il modello di pericolosità MPS19.

Monumento	Tipologia di Suolo	Curva di fragilità	Danni da terremoto	λ_{OT}	T _r	$P(C \lambda_{OT}, 2500)$	$\lambda_{OT (DCFD)}$	$T_{r(DCFD)}$	$P(C \lambda_{l (DCFD)}, 2500)$	$\lambda_{OT} \leq \lambda_0$	$\lambda_{OT(DCFD)} \leq \lambda_0$
Tempio Nettuno (Paestum- Campania)	Suolo C	Kavv	No	2.57 × 10 ⁻⁵	38908 anni	6.22%	1.28 × 10 ⁻⁴	7822 anni	27.36%	Si	Si
Tempio Concordia- (Agrigento- Sicilia)	Suolo C	Kavv	No	1.82 × 10 ⁻⁵	54964 anni	4.45%	1.09 × 10 ⁻⁴	9140 anni	23.93%	Si	Si
Tempio C- (Selinunte- Sicilia)	Suolo C	Kavv	SI	2.07 × 10 ⁻⁵	48317 anni	5.04%	1.82 × 10 ⁻⁴	5481 anni	36.63%	Si	Si

Tempio di Hera Lacinia- (Capo Colonna- Crotone) Tempio Poseidone- (Taranto-Puglia)	Suolo C Suolo B	Kavv Kavv	SI No	2.69×10^{-5} 8.08 $\times 10^{-6}$	37185 anni 123810 anni	6.50% 2.00%	1.75×10^{-4} 5.19 $\times 10^{-5}$	5708 anni 19285 anni	35.47%	Si Si	Si Si
Tempio di Hera- (Metaponto- Basilicata)	Suolo B	Kavv	No	9.63 × 10 ⁻⁶	103854 anni	2.38%	6.59 × 10 ⁻⁵	15175 anni	15.19%	Si	Si
Porticato romano (La Cuma- Marche)	Suolo B	Kavv	No	4.02 × 10 ⁻⁵	24893 anni	9.56%	3.70 × 10 ⁻⁴	2701 anni	60.36%	Si	Si
Colonne San Lorenzo- (Milano- Lombardia)	Suolo C	Kavv	No	9.20 × 10 ⁻⁶	108741 anni	2.27%	8.77 × 10 ⁻⁵	11403 anni	19.69%	Si	Si
Capitolium romano-(Brescia- Lombardia)	Suolo C	Kavv	No	5.39 × 10 ⁻⁵	18544 anni	12.61%	3.72 × 10 ⁻⁴	2685 anni	60.59%	Si	Si

Basilica Romana (Sepino-Molise)	Suolo B	Kavv	Si	6.80 × 10 ⁻⁵	14715 anni	15.62%	4.59 × 10 ⁻⁴	2178 anni	68.27%	Si	No
Foro Romano (Aquileia-Friuli- Venezia-Giulia)	Suolo C	Kavv	No	1.97 × 10 ⁻⁵	50671 anni	4.81%	1.29 × 10 ⁻⁴	7749 anni	27.58%	Si	Si
Foro Romano (Velleia-Emilia- Romagna)	Suolo C	Kavv	No	3.99 × 10 ⁻⁵	25052 anni	9.50%	2.84 × 10 ⁻⁴	3525 anni	50.79%	Si	Si
Tempio di Segesta- (Calatafimi- Sicilia)	Suolo A	Kavv	No	5.15 × 10 ⁻⁶	194019 anni	1.28%	4.93 × 10 ⁻⁵	20293 anni	11.59%	Si	Si
Tempio di Apollo- (Siracusa-Sicilia)	Suolo A	Kavv	No	1.25 × 10 ⁻⁵	80282 anni	3.07%	1.03×10^{-4}	9665 anni	22.79%	Si	Si

Tab.17: Tabella riepilogativa dei parametri per tutti i monumenti della tesi considerando la funzione di fragilità di Kavvadias, considerando il modello di pericolosità MPS19.

Monumento	Tipologia di Suolo	Curva di fragilità	Danni da terremoto	λ_{OT}	T _r	$P(C \lambda_{OT}, 2500)$	$\lambda_{OT (DCFD)}$	T _{r(DCFD)}	$P(C \lambda_{OT (DCFD)}, 2500)$	$\lambda_{OT} \leq \lambda_0$	$\lambda_{OT (DCFD)} \leq \lambda_0$
Tempio Nettuno (Paestum- Campania)	Suolo C	Papad.	No	1.80 × 10 ⁻³	554 anni	98.90%	1.50 × 10 ⁻²	67 anni	100%	No	No
Tempio Concordia- (Agrigento- Sicilia)	Suolo C	Papad.	No	6.17 × 10 ⁻³	162 anni	100%	9.52 × 10 ⁻³	105 anni	100%	No	No
Tempio C- (Selinunte- Sicilia)	- Suolo C	Papad.	SI	1.80 × 10 ⁻³	556 anni	98.89%	8.13 × 10 ⁻³	123 anni	100%	No	No

Tempio di	Suolo C	Papad.	SI	3.44	291	99.98%	2.03	49 anni	100%	No	No
Hera Lacinia				$\times 10^{-3}$	anni		$\times 10^{-2}$				
(Capo											
Colonna-											
Crotone)											
Tempio	Suolo B	Papad.	No	1.16	859	94.56%	6.54	153 anni	100%	No	No
Poseidone-				$\times 10^{-3}$	anni		$\times 10^{-3}$				
(Taranto-											
Puglia)											
Tempio di	Suolo C	Papad.	No	5.08	197	100%	1.31	0 anni	100%	No	No
Hera-				$\times 10^{-3}$	anni		$\times 10^{+3}$				
(Metaponto-											
Basilicata)											
Porticato	Suolo B	Papad.	No	1.23	81	100%	3.07	0 anni		No	No
romano (La		_		$\times 10^{-2}$	anni		$\times 10^{+1}$				
Cuma-									100%		
Marche)									10070		

Colonne San Lorenzo- (Milano- Lombardia)	Suolo B	Papad.	No	2.71 × 10 ⁻³	369 anni	99.89%	1.10 × 10 ⁻²	91 anni	100%	No	No
Capitolium romano- (Brescia- Lombardia)	Suolo C	Papad.	No	6.06 × 10 ⁻³	165 anni	100%	3.68 × 10 ⁻²	27 anni	100%	No	No
Basilica Romana (Sepino- Molise)	Suolo C	Papad.	Si	1.22 × 10 ⁻²	82 anni	100%	9.73 × 10 ⁺²	0 anni	100%	No	No
Foro Romano (Aquileia- Friuli- Venezia- Giulia)	Suolo B	Papad.	No	6.17 × 10 ⁻³	162 anni	100%	9.52 × 10 ⁻³	105 anni	100%	No	No

Foro Romano (Velleia- Emilia- Romagna)	Suolo C	Papad.	No	5.42 × 10 ⁻³	184 anni	100%	9.02 × 10 ⁻³	111 anni	100%	No	No
Tempio di Segesta- (Calatafimi- Sicilia)	Suolo A	Papad.	No	1.08 × 10 ⁻⁴	9261 anni	23.66%	4.04 × 10 ⁻⁴	2474 anni	63.60	Si	No
Tempio di Apollo- (Siracusa- Sicilia)	Suolo A	Papad.	No	2.55 × 10 ⁻⁴	3915 anni	47.19%	4.21 × 10 ⁻⁴	2376 anni	65.08%	Si	No

Tab.18: Tabella riepilogativa dei parametri per tutti i monumenti della tesi considerando la funzione di fragilità di Papadopolos, considerando il modello di pericolosità MPS19.

Le curve di pericolosità del modello MPS19 presentano delle differenze rispetto al precedente modello di pericolosità italiano MPS04. Similmente con SHARE, i valori di hazard elaborati dal nuovo modello di pericolosità italiano sono più alti rispetto a MPS04.

Questi alti valori di pericolosità e la scelta di aver utilizzato curve di fragilità disponibili dalla bibliografia, ha portato valori più grandi nei risultati finali dei parametri del rischio sismico e che si discostano dai risultati di rischio sismico calcolati per il vecchio modello di pericolosità italiano MPS04.

Di seguito per ogni modello di fragilità considerato e in base alla tipologia di danno del monumento, verranno effettuate le interpretazioni dei risultati del rischio sismico calcolati con entrambe le metodologie considerate.

Partendo da Pappas, considerando i monumenti che non hanno subito danni, sebbene si osservino valori di rischio più grandi rispetto a MPS04, i risultati di λ_{OT} sono ancora inferiori rispetto al valore limite ritenuto ammissibile pari a 4.00 × 10⁻⁴.

Anche per MPS19 il monumento che non ha subito danni come quello di La Cuma, coerentemente con i risultati di MPS04 e SHARE ed evidenziato in tabella, presenta valori di rischio che risultano essere maggior rispetto al valore limite. Questo è un ulteriore indizio che al di là dell'adattamento della curva di fragilità mediante l'approccio semplificativo di normativa, probabilmente vi è una sottostima in quel sito.

Infine, per i monumenti che non hanno subito danni da terremoto come: Capitolium romano-(Brescia-Lombardia), Foro Romano (Aquileia-Friuli-Venezia-Giulia) e Foro Romano (Velleia-Emilia-Romagna) rispetto a MPS04 vediamo che i valori di λ_{OT} risultano essere maggiori rispetto al valore limite ammissibile λ_0 . In particolare, per il monumento di Brescia e di Aquileia il superamento del limite, al di là della curva comparativa di bibliografia, è imputabile al fatto che le stime delle curve di pericolosità in quel sito sono maggiori rispetto al modello di pericolosità precedente MPS04. Mentre per quanto riguarda il monumento di Velleia soltanto il valore di rischio λ_{OT} , calcolato con il metodo DCFD è leggermente superiore al valore soglia ottenuto dalla normativa λ_0 . Il superamento in questo caso dipende dalla metodologia di calcolo, ossia che non è stata effettuata l'integrazione tra la curva di pericolosità e la funzione di fragilità. Per quanto riguarda invece i monumenti che hanno subito danni da terremoto: Tempio C-Selinunte, Tempio di Hera-Capo Colonna e Basilica romana di Sepino si sono ottenuti i seguenti risultati con le rispettive considerazioni.

Considerando i monumenti di Selinunte e Crotone, i valori di λ_{OT} seppur maggiori rispetto a MPS04 e simili a SHARE, sono comunque inferiori rispetto al valore limite di 4.00 × 10⁻⁴, comportando quindi che i monumenti non avrebbero dovuto subire danni da terremoto.

Mentre per quanto riguarda il monumento romano di Sepino, i valori del rischio, evidenziati in arancione in tabella, sono maggiori rispetto al valore limite ritenuto ammissibile. Questo risultato è in accordo con le previsioni effettuate poiché il monumento ha subito danni da terremoto, rappresentato collasso delle colonne, dovuto all'evento sismico del 346 d.C.

In merito alla curva di fragilità di Kavvadias, i risultati ottenuti mostrati in tabella indicano come i valori di λ_{OT} calcolati con entrambe le metodologie sono inferiori rispetto al valore limite ritenuto ammissibile λ_0 .

In base a questa considerazione, tutti i monumenti scelti in questo progetto di tesi, non avrebbero dovuto subire danni da terremoto. Questa forte sottostima ci permette di dire che la curva di Kavvadias sia poco attendibile. Poiché essa è stata calcolata dall'autore di bibliografia per resistere ad alti valori di PGA, risultando essere poco cautelativa.

Infine, considerando la curva di fragilità elaborata sfruttando la relazione empirica di Papadoupolos, si osserva che tutti i risultati non verificano la relazione di attendibilità ($\lambda_{OT} < \lambda_0$). Questo comporterebbe, infatti, che tutti i monumenti scelti avrebbero dovuto subire danni da terremoto. Questa forte sovrastima dipende dalle modalità di valutazione della curva di fragilità. Infatti, essa è stata calcolata considerando una relazione empirica di collasso, di natura conservativa, che è stata implementata per un set di accelerogrammi. Quindi la curva di fragilità ottenuta è una funzione conservativa, dove per quei valori di accelerazione attese al suolo ottenuti dal modello di pericolosità, i monumenti avrebbero dovuto subire danni da terremoto.

CAPITOLO 7

VERIFICA ATTENDIBILITA' MODELLI DI PERICOLOSITA' E DISCUSSIONI

Nel presente lavoro di tesi per la verifica di attendibilità dei modelli di pericolosità ho sviluppato i seguenti aspetti:

- a) aspetti metodologici per la ricerca dei dati indipendenti ai modelli di pericolosità considerati, valutazione della fragilità delle strutture e calcolo del rischio sismico
- b) aspetti inerenti alla verifica dei risultati ottenuti nelle tabelle mostrati nei capitoli precedente.

Per la ricerca dei dati indipendenti ai modello di pericolosità, sono stati scelti i monumenti di epoca greca e romana, che abbiano una struttura semplice simile alle Preacarious Rocks, presenti in America o agli speleotemi presenti nella cava di Cola in Italia (Pace et. al. 2021).

La stima delle curve di fragilità per questa tipologia di strutture è avvenuta mediante ricerca bibliografica. Le curve di fragilità, calcolate dagli autori di bibliografia sono state calcolate considerando come valore di scuotimento al suolo la PGA. Per questo motivo il calcolo del rischio sismico è avvenuto considerando soltanto come funzione di pericolosità, quella espressa soltanto in funzione di quel parametro di scuotimento del terreno.

Conoscere la probabilità di collasso dei monumenti in un intervallo di tempo pari alla loro età di costruzione, 2500 anni, permette di poter verificare se le stime di pericolosità del modello siano accurate o no.

Nei capitoli precedenti, sono state mostrati in forma tabellare per ognuno dei modelli pericolosità considerati (MPS04, SHARE e MPS19) per le curve di fragilità di bibliografia di Pappas, Kavvadias e Papadoupolos, i risultati ottenuti dal calcolo del rischio sismico mediante il metodo d'integrazione e il metodo DCFD.

I seguenti risultati sono stati sottoposti a test di verifica, consistita dal confronto del livello di danno subito dei monumenti e il rispetto della seguente diseguaglianza ($\lambda_{OT} < \lambda_0$), dove i valori di rischio sismico λ_{OT} dovevano essere inferiore rispetto ad un valore limite ritenuto ammissibile λ_0 .

Una volta accertata l'attendibilità dei risultati, essi sono stati utilizzati per poter verificare la validità dei modelli di pericolosità attraverso l'analisi di consistenza e comparativa.

In particolar modo nell'analisi di consistenza, si è voluto osservare come i risultati ottenuti si distribuiscono, e se essi sono consistenti con le osservazioni dello stato di conservazione del monumento.

Nell'analisi di consistenza, sono stati scelti i valori ottenuti con il metodo dell'integrazione. In particolare, sono stati considerati le probabilità di collasso per i monumenti che hanno subito danni da terremoto (Selinunte, Crotone e Sepino) e le probabilità di sopravvivenza per i monumenti che non hanno subito danni da terremoto.

Le probabilità di sopravvivenza P(ST) sono le probabilità complementari di quelle di ribaltamento; quindi, sono state calcolate considerando la seguente relazione:

$$P(ST) = 1 - P(OT) \quad (34)$$

Una volta ricavati i valori di probabilità di sopravvivenza, essi insieme ai valori di probabilità di collasso sono stati graficati e si è studiati il loro andamento.

Più in dettagliatamente, i valori di probabilità di sopravvivenza, per i monumenti che non hanno subito danni da terremoto, sono rappresentati mediante una sfera grigia. Mentre le probabilità di collasso, per i monumenti che hanno subito danni da terremoto, sono rappresentate mediante una stellina rossa.

In base all'andamento dei valori di probabilità dei dati osservati è possibile definire euristicamente quanto le stime dei modelli di pericolosità considerati in questo progetto di tesi siano attendibili o no: in particolare, un modello attendibile deve mostrare una dispersione dei punti (sfere grigie e stelline rosse) nel grafico, mentre un modello che sovrastima il rischio deve avere le sfere grigie tutte vicino allo zero e le stelline rosse prossime ad uno, mentre un modello che sottostima deve avere le sfere grigie tutte vicino ad uno e le stelline rosse prossime allo zero.

Di seguito nelle figure successive sarà rappresentata la consistenza dei modelli di pericolosità MPS04, SHARE e MPS19 considerando le curve di fragilità di Pappas, Kavvadias e Papadoupolos.

In particolare, nelle figure 67-68-69 saranno mostrati gli esiti dell'esame di consistenza per MPS04 considerando le tre curve di bibliografia, mostrando la distribuzione dei valori di probabilità calcolati per i monumenti considerati.



Fig.67: Distribuzione dei valori di probabilità per il modello MPS04 considerando la curva di fragilità di Pappas. In particolare, con la sfera grigia si identificano le probabilità di sopravvivenza per i monumenti che non hanno subito danni da terremoto, mentre le stelline rosse indicano le probabilità di ribaltamento per i monumenti che hanno subito danni da terremoto.



Fig.68: Distribuzione dei valori di probabilità per il modello MPS04 considerando la curva di fragilità di Kavvadias. In particolare, con la sfera grigia si identificano le probabilità di sopravvivenza per i monumenti che non hanno subito danni da terremoto, mentre le stelline rosse indicano le probabilità di collasso per i monumenti che hanno subito danni da terremoto.



Fig.69: Distribuzione dei valori di probabilità per il modello MPS04 considerando la curva di fragilità di Papadoupolos. In particolare, con la sfera grigia si identificano le probabilità di sopravvivenza per i monumenti che non hanno subito danni da terremoto, mentre le stelline rosse indicano le probabilità di collasso per i monumenti che hanno subito danni da terremoto.

Mentre nelle figure 70-71-72 saranno mostrati gli esiti dell'esame di consistenza per SHARE, data dalla distribuzione dei valori di probabilità considerando i tre scenari di fragilità di bibliografia.



Fig.70: Distribuzione dei valori di probabilità per il modello SHARE considerando la curva di fragilità di Pappas. In particolare, con la sfera grigia si identificano le probabilità di sopravvivenza per i monumenti che non hanno subito danni da terremoto, mentre le stelline rosse indicano le probabilità di collasso per i monumenti che hanno subito danni da terremoto.



Fig.71: Distribuzione dei valori di probabilità per il modello SHARE considerando la curva di fragilità di Kavvadias. In particolare, con la sfera grigia si identificano le probabilità di sopravvivenza per i monumenti che non hanno subito danni da terremoto, mentre le stelline rosse indicano le probabilità di collasso per i monumenti che hanno subito danni da terremoto.



Fig.72: Distribuzione dei valori di probabilità per il modello SHARE considerando la curva di fragilità di Papadoupolos. In particolare, con la sfera si identificano le probabilità di sopravvivenza per i monumenti che non hanno subito danni da terremoto, mentre le stelline rosse indicano le probabilità di collasso per i monumenti che hanno subito danni da terremoto.
Infine, nelle figure 73, 74 e 75 sono mostrati gli esiti dell'analisi di consistenza del modello MPS19 rappresentato mediante distribuzioni dei valori di probabilità di collasso P(OT) e di standing P(ST) per tutte le curve di fragilità considerate.



Fig.73: Distribuzione dei valori di probabilità per il modello MPS19 considerando la curva di fragilità di Pappas. In particolare, con la sfera grigia si identificano le probabilità di sopravvivenza per i monumenti che non hanno subito danni da terremoto, mentre le stelline rosse indicano le probabilità di collasso per i monumenti che hanno subito danni da terremoto.



Fig.74: Distribuzione dei valori di probabilità per il modello MPS19 considerando la curva di fragilità di Kavvadias. In particolare, con la sfera grigia si identificano le probabilità di sopravvivenza per i monumenti che non hanno subito danni da terremoto, mentre le stelline rosse indicano le probabilità di collasso per i monumenti che hanno subito danni da terremoto.



Fig.75: Distribuzione dei valori di probabilità per il modello MPS19 considerando la curva di fragilità di Papadoupolos. In particolare, con la sfera grigia si identificano le probabilità di sopravvivenza per i monumenti che non hanno subito danni da terremoto, mentre le stelline rosse indicano le probabilità di collasso per i monumenti che hanno subito danni da terremoto.

Dalle figure sopra elencate si possono effettuare le seguenti considerazioni sulle analisi di consistenza effettuate sui modelli di pericolosità MPS04, SHARE e MPS19.

In particolare, osservando l'andamento dei valori di probabilità si è riscontrato che i risultati ottenuti dipendono fortemente dalle curve di fragilità utilizzate in questo lavoro di tesi.

Più in dettagliatamente, si è osservato che considerando le curve di fragilità più attendibili di Pappas, i risultati dei modelli di pericolosità MPS04, SHARE e MPS19 risultano essere consistenti con lo stato di conservazione del monumento.

Mentre se si considerano le curve di fragilità meno attendibili di Kavvadias e Papadoupolos, i risultati dei modelli di pericolosità non risultano essere consistenti con lo stato di conservazione del monumento. Infatti, esse sono state calcolate risultando essere rispettivamente una troppo poco cautelativa (tutti i monumenti non subiscono danni da terremoto) e l'altra molto cautelativa (tutti i monumenti avrebbero dovuto subire danni da terremoto).

Terminata l'analisi di consistenza, per verificare quale dei tre modelli di pericolosità risulta essere migliore è stata effettuata l'analisi comparativa. Essa consiste nel determinare le Log-Likelihood score dei valori di probabilità ottenuti. Avendo a disposizione tre modelli di fragilità, per ogni modello di pericolosità sono state calcolate tre Log-Likelihood score.

I risultati delle Log-Likelihood score dei modelli di pericolosità calcolate per ogni lavoro di bibliografia sono mostrati dalla tabella 16.

Analisi Comparativa dei Modelli di Pericolosità			
Curve di fragilità	MPS04	SHARE	MPS19
Pappas	-8.07	-13.96	-13.23
Kavvadias	-9.65	-7.50	-8.18
Papadoupolos	-39.05	-155.24	-107.67

Tab.16: Analisi comparativa dei modelli di pericolosità MPS04, SHARE e MPS19. Il confronto statistico è avvenuto calcolando le Log-Likelihood score dei valori di probabilità ottenuto dalle curve di fragilità di Pappas, Kavvadias e Papadoupolos.

Dal confronto statistico delle Log-Likelihood dei tre modelli di pericolosità mostrato dalla tabella 16, per ogni scenario di fragilità considerato, si possono trarre le seguenti considerazioni.

In particolare, in verde si evidenziano i risultati delle Log-Likelihood score per i modelli di pericolosità MP04, SHARE e MPS19 considerando le curve di fragilità più attendibili di Pappas. Da questa riga si evince che il modello di pericolosità MPS04 risulta fornire misure di pericolosità più attendibili rispetto al modello e MPS19 e SHARE, poiché aventi valori di Log-Likelihood più grandi. Mentre considerando le curve di fragilità poco attendibili di Kavvadias, dal confronto statistico delle Log-Likelihood, si evince che il modello di pericolosità SHARE risulta essere più attendibile rispetto ai modelli di pericolosità MPS04 e MPS19.

Infine, considerando la curva di fragilità poco attendibile di Papadoupolos il modello MPS04 risulta fornire misure più attendibili dei modelli MPS19 e SHARE.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro di tesi, si è sviluppato un nuovo metodo per verificare le attendibilità delle stime di pericolosità sismica forniteci dai modelli di pericolosità sismica attualmente disponibili: MPS04, SHARE e MPS19.

La verifica d'attendibilità di tali modelli è stata fatta considerando dati indipendenti ai modelli di pericolosità, che coprono un'ampia finestra temporale. In particolare, sono stati scelti i monumenti di epoca greca e romana avente una struttura semplice: templi e colonnati. Da questi, attraverso uno studio di bibliografia della vulnerabilità sismica, si sono ricavate le curve di fragilità: funzioni di probabilità che indicano ad un determinato valore di input sismico, qual è la probabilità che il sistema strutturale abbia un determinato tipo di danno contemplato. (es. ribaltamento della colonna).

Dai dati di hazard, forniti dai modelli di pericolosità, e dalle curve di fragilità, ottenute dalla bibliografia, è stato possibile calcolare la probabilità di collasso per questa tipologia di strutture mediante il calcolo del rischio sismico mediante due metodi: il metodo dell'integrazione e il metodo DCFD per tutte le curve di fragilità considerate.

Le probabilità di collasso ottenute con le due metodologie di calcolo risultano essere abbastanza simili o superiori di un ordine di grandezza per la curva di fragilità più attendibile di Pappas. Mentre per quanto riguarda le curve meno accurate di Kavvadias e Papadoupolos, i risultati sono molto diversi dovuto alla grande incertezza per la stima di queste funzioni di fragilità e dalla forma delle curve di pericolosità.

Dal confronto dei risultati di λ_{OT} ottenute con entrambe le metodologie, quando risultano essere simili, dovuta ad una corretta stima della curva di fragilità, si evince che il metodo semplificato DCFD risulta essere uno strumento aggiuntivo e valido per la determinazione del calcolo del rischio sismico.

I risultati una volta testati la loro affidabilità, mediante il confronto tra il tasso medio annuo di superamento λ_{OT} rispetto a un valore limite ritenuto ammissibile λ_0 ed eventuale presenza di danno subito dai monumenti dal terremoto, essi sono stati utilizzati per verificare l'attendibilità delle stime di hazard dei modelli di pericolosità mediante l'analisi di consistenza e comparativa.

Da questo lavoro di tesi si è osservato che i risultati ottenuti dipendono fortemente dall'accuratezza delle funzioni di fragilità, che hanno portato risultati non sempre stabili nella fase di verifica. Infatti per questo motivo sono state considerate tutte le curve di fragilità disponibili in letteratura, per poter individuare quale scenario di verifica risulta dare esiti attendibili.

Infatti, dai risultati delle analisi di consistenza e comparabilità mostrati nei capitoli precedenti, si è ritenuto che le curve di Pappas siano più accreditati per le valutazioni finali, poiché gli altri modelli portano a risultati poco stabili.

Considerando solo le curve di fragilità di Pappas, si evince che tutti i modelli di pericolosità sismica forniscono stima coerenti con le osservazioni, ed il modello di pericolosità MPS04 risulta spiegare le osservazioni meglio dei modelli MPS19 e SHARE.

È importante sottolineare però che lo sviluppo di questa metodologia di verifica è stata fatta utilizzando curve di fragilità disponibili dalla bibliografia.

Infatti, esse sono state valutate per monumenti di origine greca e romana, con caratteristiche geometriche simili a quelli utilizzati del nostro progetto di tesi.

In futuro questa nuova metodologia di verifica può essere migliorata e risultare efficace per la riduzione delle incertezze delle stime di pericolosità, soltanto se si effettuano valutazioni sulla fragilità specifiche per ogni monumento scelto. Solo riducendo di molto le incertezze critiche legate alle stime delle curve di fragilità, è possibile avere una stima più robusta della verifica d'attendibilità dei modelli di pericolosità disponibili.

Infine, quindi in questo lavoro di tesi si è visto come la metodologia di test di attendibilità di dati indipendenti applicata ai monumenti storici del nostro paese, funziona e può essere applicato in futuro come un ulteriore strumento di verifica per validare le stime di hazard ottenute dai modelli di pericolosità.

BIBLIOGRAFIA

Abrahamson, N. A., & Bommer, J. J. (2005). Probability and uncertainty in seismic hazard analysis. *Earthquake spectra*, 21(2), 603-607.

Ambraseys, N. N., Simpson, K. U., & Bommer, J. J. (1996). Prediction of horizontal response spectra in Europe. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 25(4), 371-400.

Anderson, J. G., & Brune, J. N. (1999). Methodology for using precarious rocks in Nevada to test seismic hazard models. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(2), 456-467.

Akkar, S., & Bommer, J. J. (2010). Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region, and the Middle East. Seismological Research Letters, 81(2), 195-206.

Akinci, A., Moschetti, M. P., & Taroni, M. (2018). Ensemble smoothed seismicity models for the new Italian probabilistic seismic hazard map. *Seismological Research Letters*, *89*(4), 1277-1287.

Arvidsson R, Gru nthal G (2010) SHARE D3.1—compilation of existing regional and national seismic source zones. Bruxelles

Baker, J. W. (2008). An introduction to probabilistic seismic hazard analysis (PSHA). *White paper, version, 1,* 72.

Barone, P. M., Graziano, F., Pettinelli, E., & Corradini, R. G. (2007). Ground-penetrating radar investigations into the construction techniques of the Concordia Temple (Agrigento, Sicily, Italy). Archaeological Prospection, 14(1), 47-59.

Bindi, D., Pacor, F., Luzi, L., Puglia, R., Massa, M., Ameri, G., & Paolucci, R. (2011). Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *9*(6), 1899-1920.

Boore, D. M., Joyner, W. B., & Fumal, T. E. (1997). Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: A summary of recent work. *Seismological research letters*, *68*(1), 128-153.

Bottari, C., Stiros, S. C., & Teramo, A. (2009). Archaeological evidence for destructive earthquakes in Sicily between 400 BC and AD 600. *Geoarchaeology: An International Journal*, *24*(2), 147-175.

Breiman, L. and J. H. Friedman (1985). Estimating optimal transformations for multiple regression and correlation, J. *Am. Statist. Assoc.* 80, 580-619.

Budnitz, R. J., Apostolakis, G., & Boore, D. M. (1997). *Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: guidance on uncertainty and use of experts* (No. NUREG/CR-6372-Vol. 1; UCRL-ID-122160). Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States). Div. of Engineering Technology; Lawrence Livermore National Lab., CA (United States); Electric Power Research Inst., Palo Alto, CA (United States); USDOE, Washington, DC (United States).

Cauzzi, C., & Faccioli, E. (2008). Broadband (0.05 to 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records. Journal of Seismology, 12(4), 453-475.

Cauzzi, C., Faccioli, E., Vanini, M., & Bianchini, A. (2015). Updated predictive equations for broadband (0.01–10 s) horizontal response spectra and peak ground motions, based on a global dataset of digital acceleration records. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *13*(6), 1587-1612.

Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the seismological society of America*, 58(5), 1583-1606.

Cornell, C. A., Jalayer, F., Hamburger, R. O., & Foutch, D. A. (2002). Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines. *Journal of structural engineering*, *128*(4), 526-533.

Douglas, J., Ulrich, T., & Negulescu, C. (2013). Risk-targeted seismic design maps for mainland France. *Natural Hazards*, 65(3), 1999-2013.

Ferranti, L., Pace, B., Valentini, A., Montagna, P., Pons-Branchu, E., Tisnérat-Laborde, N., & Maschio, L. (2019). Speleoseismological constraints on ground shaking threshold and seismogenic sources in the Pollino range (Calabria, southern Italy). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *124*(5), 5192-5216.

Galadini, F., & Galli, P. (2004). The 346 AD earthquake (Central-Southern Italy): an archaeoseismological approach. *Annals of Geophysics*.

Galli, P., Ruga, A., Scionti, V., & Spadea, R. (2006). Archaeoseismic evidence for a Late Roman earthquake in the Crotone area (Ionian Calabria, southern Italy): Seismotectonic implications. *Journal of seismology*, *10*(4), 443-458.

Gehl, P., Seyedi, D. M., & Douglas, J. (2013). Vector-valued fragility functions for seismic risk evaluation. Bulletin of Earthquake Engineering, 11(2), 365-384.

Gerstenberger, M. C., Marzocchi, W., Allen, T., Pagani, M., Adams, J., Danciu, L., ... & Petersen, M. D. (2020). Probabilistic seismic hazard analysis at regional and national scales: State of the art and future challenges. *Reviews of Geophysics*, *58*(2), e2019RG000653.

Guidoboni, E., Muggia, A., Marconi, C., & Boschi, E. (2002). A case study in archaeoseismology. The collapses of the Selinunte temples (Southwestern Sicily): two earthquakes identified. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *92*(8), 2961-2982.

Housner, G. W. (1963). The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes. *Bulletin of the seismological society of America*, *53*(2), 403-417.

Jalayer, F., & Cornell, C. A. (2003). A Technical Framework for Probability-Based Demand and Capacity Factor (DCFD) Seismic Formats, PEER Report 2003/08. Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley: College of Engineering, University of California.

Jalayer, F., Ebrahimian, H., & Miano, A. (2020). Intensity-based demand and capacity factor design: A visual format for safety checking. Earthquake Spectra, 36(4), 1952-1975.

Kavvadias, I. E., Vasiliadis, L. K., & Elenas, A. (2017). Seismic response parametric study of ancient rocking columns. *International Journal of Architectural Heritage*, *11*(6), 791-804.

Kennedy, R. P. (2011). Performance-goal based (risk informed) approach for establishing the SSE site specific response spectrum for future nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*, *241*(3), 648-656.

Konstantinidis, D., & Makris, N. (2005). Seismic response analysis of multidrum classical columns. *Earthquake engineering & structural dynamics*, *34*(10), 1243-1270.

Kulkarni, R. B., Youngs, R. R., & Coppersmith, K. J. (1984, July). Assessment of confidence intervals for results of seismic hazard analysis. In *Proceedings of the eighth world conference on earthquake engineering* (Vol. 1, pp. 263-270).

Makris, N., & Roussos, Y. S. (2000). Rocking response of rigid blocks under near-source ground motions. *Geotechnique*, *50*(3), 243-262.

Makris, N., & Vassiliou, M. F. (2013). Planar rocking response and stability analysis of an array of free-standing columns capped with a freely supported rigid beam. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, *42*(3), 431-449.

Marzocchi, W., Taroni, M., & Selva, J. (2015). Accounting for epistemic uncertainty in PSHA: Logic tree and ensemble modeling. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *105*(4), 2151-2159.

McGuire, R. K. (2004). *Seismic hazard and risk analysis*. Earthquake Engineering Research Institute.

Meletti, C., Marzocchi, W., D'amico, V., Lanzano, G., Luzi, L., Martinelli, F., ... & Seno, S. (2021). The new Italian seismic hazard model (MPS19). *Annals of Geophysics*, *64*(1).

NTC (2018). Norme Tecniche per le Costruzioni NTC18, Ministerial Decree 17/01/2018, Italian Official Gazzette, 42, 20 February 2018.

Pace, B., Valentini, A., Ferranti, L., Vasta, M., Vassallo, M., Montagna, P.,
... & Pons-Branchu, E. (2020). A large paleoearthquake in the Central
Apennines, Italy, recorded by the collapse of a cave
speleothem. *Tectonics*, 39(10), e2020TC006289.

Panzera, F., & Lombardo, G. (2013). Seismic property characterization of lithotypes cropping out in the Siracusa urban area, Italy. *Engineering Geology*, *153*, 12-24.

Papadopoulos, K., Vintzileou, E., & Psycharis, I. N. (2019). Finite element analysis of the seismic response of ancient columns. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 48(13), 1432-1450.

Pappas, A., da Porto, F., & Modena, C. (2016). Seismic vulnerability assessment form for free-standing columns based on a simplified numerical analysis. *International Journal of Architectural Heritage*, *10*(2-3), 281-299.

Psycharis, I. N., Fragiadakis, M., & Stefanou, I. (2013). Seismic reliability assessment of classical columns subjected to near-fault ground motions. *Earthquake engineering & structural dynamics*, *42*(14), 2061-2079.

Rathje, E. M., Abrahamson, N. A., & Bray, J. D. (1998). Simplified frequency content estimates of earthquake ground motions. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, *124*(2), 150-159.

Rood, A. H., Rood, D. H., Stirling, M. W., Madugo, C. M., Abrahamson, N. A., Wilcken, K. M., ... & Stafford, P. J. (2020). Earthquake hazard

uncertainties improved using precariously balanced rocks. AGU Advances, 1(4), e2020AV000182.

Rovida, A. N., Locati, M., CAMASSI, R. D., Lolli, B., & Gasperini, P. (2016). CPTI15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes.

Sabetta, F., & Pugliese, A. (1996). Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *86*(2), 337-352.

Sinopoli, A. (November 1, 1989). "Kinematic Approach in the Impact Problem of Rigid Bodies." ASME. *Appl. Mech. Rev.* November 1989; 42(11S): S233–S244. Smith, W. D. (1981). The b-value as an earthquake precursor. *Nature*, 289(5794), 136-139.

Shi, B., A. Anooshehpoor, Y. Zeng, and J. N. Brune (1996). Rocking and overturning of precariously balanced rocks by earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America* 86, 1,364–1,371.

Stucchi, M., Meletti, C., Montaldo, V., Crowley, H., Calvi, G. M., & Boschi, E. (2011). Seismic hazard assessment (2003–2009) for the Italian building code. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *101*(4), 1885-1911.

Thompson, M., & Warmink, J. J. (2016). Natural hazard modeling and uncertainty analysis. *Natural hazard uncertainty assessment: Modeling and decision support*, 223, 11.

Yim, C. S., Chopra, A. K., & Penzien, J. (1980). Rocking response of rigid blocks to earthquakes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 8(6), 565-587.

Zhang, J., & Makris, N. (2001). Rocking response of free-standing blocks under cycloidal pulses. *Journal of Engineering Mechanics*, *127*(5), 473-483.

APPENDICE

In questa sezione verranno riportate graficamente per ogni sito le curve di pericolosità calcolate dai modelli di pericolosità MPS04, SHARE e MPS19 rappresentate rispettivamente dai colori verde, blu e rosso, utilizzate per il calcolo del rischio sismico sia con il metodo d'integrazione e sia con il metodo DCFD.



Fig.76: Curve di pericolosità calcolate per la Basilica romana di Sepino (Molise). I colori verde, blu e rosso indicano i modelli di pericolosità di MPS04, SHARE e MPS19.



Fig.77: Curve di pericolosità calcolate per il Tempio C di Selinunte (Sicilia). I colori verde, blu e rosso indicano i modelli di pericolosità di MPS04, SHARE e MPS19.



Fig.78: Curve di pericolosità calcolate per il Tempio di Segesta (Calatifimi-Sicilia). I colori verde, blu e rosso indicano i modelli di pericolosità di MPS04, SHARE e MPS19.



Fig.79: Curve di pericolosità calcolate per il Tempio di Nettuno (Paestum-Campania). I colori verde, blu e rosso indicano i modelli di pericolosità di MPS04, SHARE e MPS19.



Fig.80: Curve di pericolosità calcolate per le Colonne di San Lorenzo (Milano-Lombardia). I colori verde, blu e rosso indicano i modelli di pericolosità di MPS04, SHARE e MPS19.



Fig.81: Curve di pericolosità calcolate per il Tempio di Hera (Metaponto-Basilicata). I colori verde, blu e rosso indicano i modelli di pericolosità di MPS04, SHARE e MPS19.



Fig.82: Curve di pericolosità calcolate per il Porticato di La Cuma (Monte Rinaldo-Marche). I colori verde, blu e rosso indicano i modelli di pericolosità di MPS04, SHARE e MPS19.



Fig.83: Curve di pericolosità calcolate per il Tempio di Hera (Crotone-Calabria). I colori verde, blu e rosso indicano i modelli di pericolosità di MPS04, SHARE e MPS19.



Fig.84: Curve di pericolosità calcolate per il Tempio Capitolino (Brescia-Lombardia). I colori verde, blu e rosso indicano i modelli di pericolosità di MPS04, SHARE e MPS19.



Fig.85: Curve di pericolosità calcolate per il Foro Romano di Aquileia (Friuli-Venezia Giulia). I colori verde, blu e rosso indicano i modelli di pericolosità di MPS04, SHARE e MPS19.



Fig.86: Curve di pericolosità calcolate per il Tempio Concordia (Agrigento-Sicilia). I colori verde, blu e rosso indicano i modelli di pericolosità di MPS04, SHARE e MPS19.



Fig.87: Curve di pericolosità calcolate per il Foro Romano di Velleia (Emilia-Romagna). I colori verde, blu e rosso indicano i modelli di pericolosità di MPS04, SHARE e MPS19.



Fig.88: Curve di pericolosità calcolate per il Tempio di Poseidone (Taranto-Puglia). I colori verde, blu e rosso indicano i modelli di pericolosità di MPS04, SHARE e MPS19.



Fig.89: Curve di pericolosità calcolate per il Tempio di Apollo-Ortigia (Siracusa-Sicilia). I colori verde, blu e rosso indicano i modelli di pericolosità di MPS04, SHARE e MPS19.

Di seguito invece nelle figure successive, verranno mostrate per ogni monumento le tre curve di fragilità di Pappas, Papadoupolos e Kavvadias rappresentate rispettivamente dai colori rosso,verde e blu utilizzate per il calcolo del rischio sismico



Fig.90: *Curve di fragilità di Pappas (Rosso), Papadoupolos (Verde) e Kavvadias (Blu) calcolate per il Tempio Concordia-(Agrigento-Sicilia).*



Fig.91: Curve di fragilità di Pappas (Rosso), Papadoupolos (Verde) e Kavvadias (Blu) calcolate per il Foro Romano di Aquileia-(Friuli-Venezia Giulia).



Fig.92: Curve di fragilità di Pappas (Rosso), Papadoupolos (Verde) e Kavvadias (Blu) calcolate per il Tempio Capitolino-(Brescia-Lombardia).



Fig.93: Curve di fragilità di Pappas (Rosso), Papadoupolos (Verde) e Kavvadias (Blu) calcolate per il Tempio di Hera-(Crotone-Calabria).



Fig.94: Curve di fragilità di Pappas (Rosso), Papadoupolos (Verde) e Kavvadias (Blu) calcolate per il Porticato di La Cuma-(Monte Rinaldo-Marche).



Fig.95: Curve di fragilità di Pappas (Rosso), Papadoupolos (Verde) e Kavvadias (Blu) calcolate per il Tempio di Hera-(Metaponto-Basilicata).



Fig.96: *Curve di fragilità di Pappas (Rosso), Papadoupolos (Verde) e Kavvadias (Blu) calcolate per le Colonne di San Lorenzo-(Milano-Lombardia).*



Fig.97: *Curve di fragilità di Pappas (Rosso), Papadoupolos (Verde) e Kavvadias (Blu) calcolate per il Tempio di Nettuno-(Paestum-Campania).*



Fig.98: Curve di fragilità di Pappas (Rosso), Papadoupolos (Verde) e Kavvadias (Blu) calcolate per il Tempio di Segesta-(Calatifimi-Sicilia).



Fig.99: Curve di fragilità di Pappas (Rosso), Papadoupolos (Verde) e Kavvadias (Blu) calcolate per il Tempio di C di Selinunte-(Sicilia).



Fig.100: *Curve di fragilità di Pappas (Rosso), Papadoupolos (Verde) e Kavvadias (Blu) calcolate per la Basilica Romana di Sepino-(Molise).*



Fig.101: *Curve di fragilità di Pappas (Rosso), Papadoupolos (Verde) e Kavvadias (Blu) calcolate per il Tempio Apollo di Ortigia-(Siracusa-Sicilia).*



Fig.102: *Curve di fragilità di Pappas (Rosso), Papadoupolos (Verde) e Kavvadias (Blu) calcolate per il Tempio di Poseidone-(Taranto-Puglia).*



Fig.103: *Curve di fragilità di Pappas (Rosso), Papadoupolos (Verde) e Kavvadias (Blu) calcolate per il Foro Romano di Velleia-(Emilia-Romagna).*

RINGRAZIAMENTI

Sono giunto alla fine del mio percorso di dottorato e non posso non scrivere un pensiero per ricordare e ringraziare tutti coloro che mi hanno aiutato e sopportato durante questi tre anni di dottorato.

In particolare, vorrei ringraziare:

Il prof. Warner Marzocchi, il mio tutor, per avermi dato l'opportunità di poter lavorare e realizzare questo progetto di ricerca. Lo ringrazio per la sua disponibilità e per tutto quello che mi ha insegnato in questi tre anni. Spero di essere stato un buon dottorando per lui e che sia soddisfatto del lavoro fatto insieme.

L' Ing. Prof. Fatemeh Jalayer, la mia co-tutor, per la gentilezza e pazienza nel formarmi nelle nozioni d'ingegneria utili per lo svolgimento della mia tesi.

Il Dottor. Marcus Herrmann, un napoletano per caso, per la sua disponibilità e per la sua amicizia. Anche se all'inizio avevamo difficoltà a comunicare, mi ha aiutato molto a migliorare nell'inglese. Confrontarmi con lui è sempre un'occasione di crescita. Lo stimo molto!

I miei genitori, che tra mille sacrifici mi hanno dato l'opportunità di studiare. Ringrazio soprattutto la loro fiducia e il loro supporto nei miei momenti di difficoltà e spero di non deluderli mai.

Mia sorella Maria e suo marito Giorgio, che nonostante la distanza continuano ad essere presente nella mia vita insieme a mia "nipota".

Ringrazio i colleghi universitari, quelli del conservatorio e amici di sempre per non avermi fatto mai mancare il loro supporto nel periodo di realizzazione della tesi di dottorato. In particolare, di questi vorrei ringraziare: Maurizio Milano, Andrea Barone, Giulio di Fiore, Delia Cusano, Palmira Marsiglia, Camilla Marino, Alessio Cibelli, Alessandro Buglione, Amedeo Cauceglia, Mario de Matteis, Andrea Bauduin, Alessandra Coppola, Luca Licciardi, Gennaro Casolare, Armando Chioccarelli, Roberto D'Onofrio, Francesco Esposito, Francesco Lippiello, Andrea De Falco, Pietro Rufolo e Andrea Vitiello.