

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA CIVILE

DICAM

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali

TESI DI LAUREA

in

Progetti di strutture LS

**CRITERI DI SELEZIONE DEGLI ACCELEROGRAMMI REGISTRATI PER
LA PROGETTAZIONE DI STRUTTURE IN ZONA SISMICA**

CANDIDATO:
Veronica Ligabue

RELATORE:
Chiar.mo Prof. Ing. Marco Savoia

CORRELATORE:
Dott. Ing. Nicola Buratti

Anno Accademico 2010/11
Sessione II

Sommario

Introduzione	1
1. Stato dell'arte	7
2. Analisi di pericolosità sismica	13
1. definizione delle classi di magnitudo	17
2. scelta del catalogo sismico di riferimento	17
3. definizione del luogo oggetto dell'analisi di pericolosità sismica:.....	19
4. zonazione sismogenetica	19
5. parametrizzazione delle leggi di ricorrenza	19
6. scelta delle ordinate spettrali	27
7. definizione delle relazioni di attenuazione	28
8. imposizione dei parametri per l'integrazione	29
3. Relazioni di attenuazione.....	33
1. Definizione del catalogo accelerometrico	33
2. Relazioni di attenuazione per l'oscillatore elastico.....	34
3. confronto con altre relazioni di attenuazione proposte.....	45
4. Relazioni di attenuazione per l'oscillatore elastoplastico.....	46
5. Confronto con le relazioni di attenuazione in termini esponenziali.....	53
4. Risultati dell'analisi di pericolosità sismica.....	57
5. Criteri di scelta	65
1. procedura per l'individuazione dei gruppi di accelerogrammi.....	65
2. preselezione in termini di magnitudo e distanza sito-sorgente:	67

3. preselezione in base all'intervallo di periodi considerati	100
4. preselezione in termini di una combinazione di distanza e magnitudo:...	
.....	105
5. eliminazione delle registrazioni che singolarmente sono più vicine allo spettro.....	111
6. scalatura degli accelerogrammi.....	113
6. Conclusioni	117
7. Bibliografia.....	119

Indice delle tabelle e delle figure

Tabella 1: classi di magnitudo. Alla classe 12 appartiene anche un sisma di magnitudo 7.41.	17
Tabella 2: intervalli di completezza CO-04.....	18
Tabella 3: tassi di superamento annui di M minima (sismi/anno)	20
Tabella 4: pendenze e coefficienti di variazione delle leggi di G-R.....	21
Tabella 5: magnitudo massime deterministiche.....	22
Tabella 6: sismi originati nella ZS919	23
Tabella 7: numero di sismi per classe	24
Tabella 8: intervalli temporali di completezza del catalogo per ogni classe di M	24
Tabella 9: numero di sismi/anni di completezza	24
Tabella 10: tassi di superamento cumulati annui	25
Tabella 11: pendenze locali.....	26
Tabella 12: periodi degli oscillatori elastici	34
Tabella 13: numero di registrazioni per le quali $\delta > \delta_{\text{snervamento}} (q=1)$	48
Tabella 14: parametri che caratterizzano la distribuzione degli spostamenti elastici ed elastoplastici per $q=1$	48
Tabella 15: esponenti considerati.....	53
Tabella 16: esponenti adottati per ogni oscillatore	55
Tabella 17: R^2 per (spostamenti) ^{α}	55
Tabella 18: R^2 per log(spostamenti).....	55
Tabella 19: $psa(0.05s)$ e tassi di superamento.....	58
Tabella 20: scenari sismici ottenuti dalla disaggregazione;.....	64
Tabella 21: scenari sismici ottenuti dalla disaggregazione;.....	99

Tabella 22: confronto tra accelerogrammi individuati con preselezione rispetto a intervalli diversi di M (T=0.5, q=1)	109
Tabella 23: Δ ottenuti tramite la preselezione delle registrazioni in termini di M e R_{JB} (T=0.5s, q=1).....	110
Tabella 24: Δ ottenuti tramite preselezione in termini di M e R_{JB} delle registrazioni scalate (T=0.5s, q=1 e T=[0.48, 0.55])	114
Tabella 24: Δ ottenuti tramite preselezione in termini di M e R_{JB} delle registrazioni scalate (T=0.5s, q=1 e T=[0.48, 0.7])	116
Figura 1: frequenze di superamento annue in funzione della magnitudo.....	25
Figura 2: distanza di Joyner-Boore (da Kaklamanos, Baise e Boore, 2011).....	31
Figura 3: PGA per un periodo di ritorno di 475 anni, valori in m/s^2	31
Figura 4: schermata dei risultati di CRISIS	32
Figura 5: disaggregazione della pericolosità sismica per un tempo di ritorno di 475 anni; la magnitudo è stata suddivisa in 20 intervalli mentre la distanza in 100	32
Figura 6: residuali standardizzati suddivisi per terremoto.....	37
Figura 7: distribuzione dei residuali standardizzati in funzione del terremoto	38
Figura 8: residuali standardizzati in funzione della magnitudo.....	39
Figura 9: residuali standardizzati in funzione della distanza (in scala logaritmica)	39
Figura 10: residuali standardizzati in funzione del tipo di terreno.....	40
Figura 11: distribuzione del log(PGA) rispetto alla Gaussiana.....	40
Figura 12: distribuzione dei logaritmi dei residuali rispetto alla Gaussiana.....	41
Figura 13: quantili dei residuali	41
Figura 14: curva di frequenza cumulata	43
Figura 15: curva di frequenza cumulata standard	43

Figura 16: rappresentazione della dispersione statistica delle pseudoaccelerazioni e del troncamento operato sulla distribuzione	44
Figura 17: confronto tra diverse relazioni di attenuazione (per $M=5$, $R_{JB}=10\text{km}$, $V_{S,30}=1000$).....	45
Figura 18: periodi e fattori di struttura.....	46
Figura 19: relazioni di attenuazione in termini di spostamento ($M=5$).....	47
Figura 20: diagramma quantile-quantile dei residuali per $q=4$ e $T=0.1\text{s}$	50
Figura 21: diagramma quantile-quantile dei residuali per $q=4$ e $T=0.3\text{s}$	50
Figura 22: diagramma quantile-quantile dei residuali per $q=4$ e $T=0.5\text{s}$	51
Figura 23: diagramma quantile-quantile dei residuali per $q=4$ e $T=1\text{s}$	51
Figura 24: diagramma quantile-quantile dei residuali per $q=4$ e $T=2\text{s}$	52
Figura 25: grafico dei quantili per il logaritmo e l'esponenziale degli spostamenti.....	54
Figura 26: R^2 in funzione dell'esponente di X_{\max} ($T=0.1\text{s}$, $q=1$).....	54
Figura 27:.....	56
Figura 28: tassi di superamento in funzione di $psa(0.05\text{s})$	59
Figura 29: spettro elastico per un periodo di ritorno di 475 anni	60
Figura 30: spettro in termini di spostamento per un periodo di ritorno di 475 anni.....	60
Figura 31: disaggregazione per $T=0.1\text{s}$, Distanze da 0 a 250km, magnitudo da 4.65 a 7.41.....	61
Figura 32: disaggregazione per $T=0.3\text{s}$, Distanze da 0 a 250km, magnitudo da 4.65 a 7.41.....	62
Figura 33: disaggregazione per $T=0.5\text{s}$, Distanze da 0 a 250km, magnitudo da 4.65 a 7.41.....	62
Figura 34: disaggregazione per $T=1\text{s}$, Distanze da 0 a 250km, magnitudo da 4.65 a 7.41.....	63
Figura 35: disaggregazione per $T=2\text{s}$, Distanze da 0 a 250km, magnitudo da 4.65 a 7.41.....	63

Figura 36: confronto tra Δ ottenuti effettuando diverse preselezioni in termini di magnitudo per $T=0.1s$	68
Figura 37: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=1$ e $T=0.1s$).....	68
Figura 38: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=2$ e $T=0.1s$).....	69
Figura 39: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=3$ e $T=0.1s$).....	69
Figura 40: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=4$ e $T=0.1s$).....	70
Figura 41: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=5$ e $T=0.1s$).....	70
Figura 42: confronto tra Δ ottenuti effettuando diverse preselezioni in termini di magnitudo per $T=0.3s$	71
Figura 43: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=1$ e $T=0.3s$).....	71
Figura 44: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=2$ e $T=0.3s$).....	72
Figura 45: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=3$ e $T=0.3s$).....	72
Figura 46: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=4$ e $T=0.3s$).....	73
Figura 47: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=5$ e $T=0.3s$).....	73
Figura 48: confronto tra Δ ottenuti effettuando diverse preselezioni in termini di magnitudo per $T=0.5s$	74
Figura 49: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=1$ e $T=0.5s$).....	74

Figura 50: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=2$ e $T=0.5s$).....75

Figura 51: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=3$ e $T=0.5s$).....75

Figura 52: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=4$ e $T=0.5s$).....76

Figura 53: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=5$ e $T=0.5s$).....76

Figura 54: confronto tra Δ ottenuti effettuando diverse preselezioni in termini di magnitudo per $T=1s$ 77

Figura 55: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=1$ e $T=1s$).....77

Figura 56: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=2$ e $T=1s$).....78

Figura 57: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=3$ e $T=1s$).....78

Figura 58: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=4$ e $T=1s$).....79

Figura 59: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=5$ e $T=1s$).....79

Figura 60: confronto tra Δ ottenuti effettuando diverse preselezioni in termini di magnitudo per $T=2s$ 80

Figura 61: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=1$ e $T=2s$).....80

Figura 62: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=2$ e $T=2s$).....81

Figura 63: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=3$ e $T=2s$).....81

Figura 64: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=4$ e $T=2s$).....	82
Figura 65: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=5$ e $T=2s$).....	82
Figura 66: confronto tra Δ ottenuti effettuando diverse preselezioni in termini di distanza per $T=0.1s$	84
Figura 67: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=1$ e $T=0.1s$).....	84
Figura 68: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=2$ e $T=0.1s$).....	85
Figura 69: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=3$ e $T=0.1s$).....	85
Figura 70: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=4$ e $T=0.1s$).....	86
Figura 71: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=5$ e $T=0.1s$).....	86
Figura 72: confronto tra Δ ottenuti effettuando diverse preselezioni in termini di distanza per $T=0.3s$	87
Figura 73: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=1$ e $T=0.3s$).....	87
Figura 74: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=2$ e $T=0.3s$).....	88
Figura 75: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=3$ e $T=0.3s$).....	88
Figura 76: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=4$ e $T=0.3s$).....	89
Figura 77: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=5$ e $T=0.3s$).....	89

Figura 78: confronto tra Δ ottenuti effettuando diverse preselezioni in termini di distanza per $T=0.5s$ 90

Figura 79: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=1$ e $T=0.5s$)90

Figura 80: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=2$ e $T=0.5s$)91

Figura 81: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=3$ e $T=0.5s$)91

Figura 82: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=4$ e $T=0.5s$)92

Figura 83: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=5$ e $T=0.5s$)92

Figura 84: confronto tra Δ ottenuti effettuando diverse preselezioni in termini di distanza per $T=1s$93

Figura 85: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=1$ e $T=1s$)93

Figura 86: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=2$ e $T=1s$)94

Figura 87: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=3$ e $T=1s$)94

Figura 88: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=4$ e $T=1s$)95

Figura 89: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=5$ e $T=1s$)95

Figura 90: confronto tra Δ ottenuti effettuando diverse preselezioni in termini di distanza per $T=2s$96

Figura 91: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=1$ e $T=2s$)96

Figura 92: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=2$ e $T=2s$).....	97
Figura 93: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=3$ e $T=2s$).....	97
Figura 94: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=4$ e $T=2s$).....	98
Figura 95: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=5$ e $T=2s$).....	98
Figura 96: esempio di compatibilità tra spettro medio (linea spessa grigia) e spettro isoprobabile (linea spessa nera) per $T=[0.28s,0.32s]$	100
Figura 97: esempio di compatibilità tra spettro medio (linea spessa grigia) e spettro isoprobabile (linea spessa nera) per $T=[0.3s,0.5s]$	100
Figura 98: Δ associati a varie combinazioni di ampiezza e posizione degli intervalli di T ($q=1$ e $T=0.1s$).....	102
Figura 99: Δ associati a varie combinazioni di ampiezza e posizione degli intervalli di T ($q=2$ e $T=0.1s$).....	102
Figura 100: Δ associati a varie combinazioni di ampiezza e posizione degli intervalli di T ($q=3$ e $T=0.1s$).....	103
Figura 101: Δ associati a varie combinazioni di ampiezza e posizione degli intervalli di T ($q=4$ e $T=0.1s$).....	103
Figura 102: Δ associati a varie combinazioni di ampiezza e posizione degli intervalli di T ($q=5$ e $T=0.1s$).....	104
Figura 103: esempio di preselezione delle registrazioni in termini di magnitudo e distanza	105
Figura 104: Δ associati a varie combinazioni di intervalli di magnitudo e distanza ammissibili ($T=0.5s$, $q=1$)	106
Figura 105: Δ associati a varie combinazioni di intervalli di magnitudo e distanza ammissibili ($T=0.5s$, $q=2$	106

Figura 106: Δ associati a varie combinazioni di intervalli di magnitudo e distanza ammissibili ($T=0.5s$, $q=3$)	107
Figura 107: Δ associati a varie combinazioni di intervalli di magnitudo e distanza ammissibili ($T=0.5s$, $q=4$)	107
Figura 108: Δ associati a varie combinazioni di intervalli di magnitudo e distanza ammissibili ($T=0.5s$, $q=5$)	108
Figura 109: confronto tra lo spostamento e la deviazione standard del gruppo formato a partire dai 25 accelerogrammi più spettrocompatibili (puntini spessi) e quello formato scartando tali accelerogrammi (puntini sottili) per $T=0.3s$ e q da 1 a 5.....	112
Figura 110: confronto tra lo spostamento e la deviazione standard del gruppo formato a partire dai 25 accelerogrammi più spettrocompatibili (puntini spessi) e quello formato scartando tali accelerogrammi (puntini sottili) per $T=0.5s$ e q da 1 a 5.....	112
Figura 111: confronto tra media e deviazione standard degli spostamenti ottenuti considerando fattori di scala ottimali e perturbati.....	113
Figura 112: rappresentazione grafica dei Δ ottenuti tramite preselezione in termini di M e R_{JB} delle registrazioni scalate ($T=0.5s$, $q=1$ e $T=[0.48, 0.55]$) ..	115
Figura 112: rappresentazione grafica dei Δ ottenuti tramite preselezione in termini di M e R_{JB} delle registrazioni scalate ($T=0.5s$, $q=1$ e $T=[0.48, 0.7]$)	116

Introduzione

Tra i metodi di analisi attualmente utilizzati per la progettazione e la verifica di strutture potenzialmente soggette ad azioni sismiche, quello che riesce a cogliere in modo più accurato il comportamento strutturale è l'analisi dinamica non lineare. Questa metodologia permette di prevedere la risposta dei vari elementi strutturali interessati dall'eventuale terremoto studiando come questi interagiscano durante la formazione e la propagazione dei danneggiamenti.

La normativa richiede che la modellazione dell'input sismico avvenga tramite l'uso di gruppi di accelerogrammi reali e la loro scelta è affidata al progettista. Questa selezione deve essere operata sulla base della compatibilità della media delle registrazioni con lo spettro di risposta elastico associato ad una determinata probabilità di superamento durante la vita utile della struttura, per un range di periodi vicini a quello fondamentale della costruzione.

Questo modo di procedere è tuttavia molto convenzionale a partire dal riferimento che viene utilizzato per la scelta delle registrazioni. Esse infatti sono selezionate in gruppi sulla base delle compatibilità tra il loro spettro medio e quello elastico di riferimento. I risultati delle analisi strutturali svolte utilizzando gli accelerogrammi così individuati sono a loro volta rappresentati tramite il loro valore medio. Tale modo di procedere è sicuramente corretto con riferimento alle strutture con comportamento lineare. Analizzando però strutture con elevate capacità dissipative, legate al comportamento non lineare, si rende necessario verificare che tali criteri di scelta possano fornire anche in questi casi stime accurate della risposta strutturale (tipicamente

espressa in termini di spostamento di interpiano). In questi casi, infatti, possono essere significativi alcuni parametri trascurabili con riferimento alle strutture lineari, ad esempio: magnitudo, distanza sito-sorgente, durata delle registrazioni, dispersione degli spettri nell'intorno del valore di riferimento, etc.

Questa tesi ha come obiettivo la vagliatura di ulteriori criteri per la scelta di accelerogrammi reali che permettano individuare quei gruppi che, oltre ad essere spettrocompatibili, siano effettivamente rappresentativi della sismicità del luogo dove è situata la struttura, cioè in grado di generare sul modello usato per l'analisi dinamica livelli di plasticizzazione confrontabili con quelli attesi con un fissato periodo di ritorno nel corso della vita della costruzione.

Nel primo capitolo viene proposta una panoramica dei metodi di selezione che si possono trovare in letteratura: in generale questi si possono distinguere in base al parametro di risposta strutturale che si intende stimare tramite l'analisi non lineare. Alcuni criteri sono utilizzati per la ricerca del valore medio della grandezza che caratterizza il comportamento della costruzione, mentre altri permettono di valutarne la distribuzione di probabilità (in termini di valore medio e deviazione standard). Sono anche brevemente illustrate le criticità associate ad ogni metodo.

Nel secondo capitolo si introduce l'analisi di pericolosità sismica, una procedura che permette di valutare il periodo di ritorno di eventi sismici di diversa intensità in un dato sito. Convenzionalmente si vuole identificare un sisma di entità tale da causare nel sito in esame degli scuotimenti ai quali è associata una probabilità di superamento del 10% in 50 anni. In questa tesi l'analisi viene svolta in modo probabilistico (PSHA), combinando gli effetti sulla struttura di tutti i possibili scenari sismici e individuando il valore di uno o più parametri rappresentativi del moto del suolo associati alla probabilità di superamento indicata.

La PSHA è eseguita servendosi di CRISIS2007, un software che permette di ricavare lo spettro di risposta isoprobabile in termini di pseudoaccelerazione e spostamento una volta definite la sismicità, le leggi di ricorrenza e le relazioni di attenuazione per ogni zona sorgente.

L'analisi è stata effettuata considerando due tipi di strutture ad un grado di libertà: il primo gruppo è formato da oscillatori elastici lineari caratterizzati da diversi periodi propri di vibrazione, mentre il secondo gruppo è costituito da oscillatori elastoplastici caratterizzati dal 5% di incrudimento e dal 5% di smorzamento viscoso. Sono definiti a partire da un progetto simulato per il quale viene introdotto e fatto variare il fattore di struttura q da 1 a 5, cioè ipotizzando che la forza di snervamento oltre la quale comincia il comportamento plastico sia q volte più piccola rispetto alla forza agente nel caso di comportamento elastico lineare. Si vuole infatti studiare il comportamento dell'oscillatore in funzione del suo grado di plasticizzazione, poiché la struttura associata a $q=1$ avrà un comportamento molto simile a quella elastica mentre per $q=5$ la struttura presenterà un'ampia escursione in campo plastico.

La procedura per ottenere relazioni di attenuazione ad hoc per questo studio, cioè coerenti con il catalogo sismico utilizzato per la definizione di tutti i parametri riportati nella tesi, è riportata in dettaglio nel capitolo 3. Queste relazioni vengono ricavate in modo distinto per lo studio dell'oscillatore elastico e elastoplastico perché nel primo caso il parametro utilizzato per indagare la propagazione delle onde sismiche con la distanza è la pseudoaccelerazione, mentre nel secondo caso viene usato lo spostamento massimo della struttura (X_{max}).

Le relazioni di attenuazione vengono calibrate a partire dai valori di psa e X_{max} associati a tutti gli eventi sismici presenti nel catalogo (l'INGA Database) suddivisi in base al periodo al quale sono riferiti. Attraverso una procedura di

regressione non lineare vengono quindi stimate le costanti della relazione empirica che lega ogni ordinata spettrale alla distanza, alla magnitudo e alla tipologia di suolo secondo la relazione:

$$\log_{10} \text{psa}(T) = c_1 + c_2 \cdot M + c_3 \cdot (M - 6)^2 + (c_4 + c_5 \cdot M) \cdot \log_{10} \left(\sqrt{R^2 + c_6^2} \right) + c_7 \\ \cdot \log_{10}(V_{S,30})$$

oppure:

$$\log_{10} X_{\max}(T) = c_1 + c_2 \cdot M + c_3 \cdot (M - 6)^2 + (c_4 + c_5 \cdot M) \cdot \log_{10} \left(\sqrt{R^2 + c_6^2} \right) + c_7 \\ \cdot \log_{10}(V_{S,30})$$

La relazione trovata per la struttura elastica lineare viene poi confrontata con altre formulazioni presenti in letteratura per accertarne la validità.

Viene inoltre suggerita una formulazione alternativa per queste relazioni nella quale le ordinate spettrali non vengono considerate in forma logaritmica ma esponenziale. Tenendo conto di questa trasformazione i dati sembrano distribuirsi meglio secondo una normale, distribuzione che viene ipotizzata in fase di regressione, soprattutto nel caso di oscillatori plastici caratterizzati da periodi fondamentali bassi ($T=0.1s$, $T=0.3s$).

Nel capitolo 4 sono riportati gli spettri di risposta isoprobabili in termini di pseudoaccelerazione e spostamento ottenuti dalla PSHA. E' anche mostrato il risultato della disaggregazione della pericolosità sismica per un periodo di ritorno di 475 anni.

Il capitolo 5 raccoglie i risultati di questo studio. Vengono analizzati vari criteri di preselezione capaci di fornire gruppi di accelerogrammi compatibili con lo spettro di risposta isoprobabile e contemporaneamente in grado di cogliere il comportamento non lineare della struttura. Questa seconda caratteristica viene verificata confrontando gli spostamenti massimi indotti sulla struttura dai sismi registrati selezionati con gli spostamenti ottenuti dall'analisi di

pericolosità sismica, caratterizzati cioè da una probabilità di superamento del 10% in 50 anni. In particolare viene studiato come l'introduzione di restrizioni sui parametri quali la distanza massima tra sito e sorgente, la magnitudo degli eventi sismici, la distanza tra la pseudoaccelerazione dello spettro elastico e quella relativa agli accelerogrammi reali in corrispondenza del periodo fondamentale della struttura e il numero minimo di accelerogrammi per ogni gruppo influenza la risposta in termini di spostamento dell'oscillatore elastoplastico considerato.

1. Stato dell'arte

In letteratura sono stati proposti svariati criteri per la selezione degli accelerogrammi reali. Questi metodi si differenziano sulla base dell'obiettivo dell'analisi dinamica non lineare e, in generale, è possibile distinguere procedure atte alla stima della risposta strutturale media per un dato scenario sismico e procedure che si prefiggono di fornire informazioni sulla distribuzione probabilistica della risposta strutturale.

Il primo metodo indagato consiste nello scegliere le registrazioni in funzione di uno scenario sismico espresso in termini di magnitudo e di distanza sito-sorgente. Tale scenario può, ad esempio, essere definito dalla disaggregazione della pericolosità sismica valutata tramite analisi probabilistica (chiamata sinteticamente PSHA) ed è quindi caratterizzato dalla combinazione di M (magnitudo) e R (distanza sito-sorgente) che contribuisce maggiormente alla pericolosità. Tuttavia parecchi studi (Iervolino e Cornell, 2005; Carballo, 2000; Bazzurro e Cornell, 1994) hanno mostrato come la risposta non lineare delle strutture non dipenda dalla preselezione in termini di distanza, mentre è influenzata dalla magnitudo. In particolare Stewart e altri (2001) hanno proposto di considerare per la selezione un range di magnitudo di ampiezza $\pm 0.25M_w$ (dove M_w è il valore dato dalla disaggregazione) mentre Bommer e Acevedo (2004) hanno suggerito l'intervallo $\pm 0.20M_w$.

E' stato anche proposto di affinare questo criterio di scelta introducendo il valore di ϵ , che rappresenta la distanza tra lo spettro di un accelerogramma e l'accelerazione spettrale media predetta da una data relazione di

attenuazione per assegnati valori di frequenza, magnitudo e distanza (Baker e Cornell, 2006).

Il tipo di suolo nel sito in esame può essere utilizzato come ulteriore criterio di scelta: infatti la stratigrafia del terreno modifica le caratteristiche delle onde sismiche che lo attraversano. La $V_{s,30}$ (velocità media di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 m di profondità del terreno) è il parametro utilizzato per definire le categorie di suolo. Secondo Bommer e Scott (2000), però, aggiungere delle condizioni sui valori di $V_{s,30}$ agli intervalli già definiti di magnitudo e distanza riduce drasticamente il numero di registrazioni ammissibili e quindi il criterio risulta troppo restrittivo.

La durata degli scuotimenti è correlata dalla magnitudo dell'evento sismico che è già stata considerata tra i parametri per la preselezione. Per questo motivo la durata è considerata di interesse secondario per la scelta delle registrazioni (Hancock e Bommer, 2006). Va notato però che il parametro non influenza la risposta della struttura in termini di spostamento ma incide sulle grandezze di tipo energetico.

Altri autori hanno proposto di considerare il meccanismo di rottura, il tipo di faglia, la traiettoria delle onde sismiche e altri elementi che identificano la sismologia delle zone sorgenti; tuttavia l'influenza delle caratteristiche geofisiche delle aree sismogenetiche sulla risposta strutturale non è ancora stata studiata in modo soddisfacente.

Per concludere si può citare anche il rapporto tra accelerazione e velocità (Tso, Zhu e Heidebrecht, 1992): questo valore tiene conto in modo complessivo di magnitudo, distanza e contenuto in frequenza degli accelerogrammi ma non può essere usato come unico criterio di selezione.

Altre tipologie di criteri di selezione impiegano invece gli spettri di risposta come riferimento per l'identificazione degli accelerogrammi da usare nelle

analisi. In questo caso è valutata la compatibilità tra lo spettro di un singolo accelerogramma o lo spettro medio di un gruppo di accelerogrammi, e uno spettro target. Gli spettri più comunemente utilizzati come riferimento sono isoprobabili ma recentemente sono state proposte tecniche che ne prendono in considerazione anche altri, ricavati direttamente dalle relazioni di attenuazione (Buratti, Stafford e Bommer, 2011). Uno sviluppo particolarmente interessante di questa classe di procedure è stata l'introduzione del cosiddetto Conditional Mean Spectrum, CMS-ε, uno spettro medio condizionato al verificarsi di un preciso valore di intensità dello scuotimento, ottenuto considerando la correlazione tra le accelerazioni spettrali a diverse frequenze (Baker e Cornell, 2006).

Esistono inoltre tecniche, dette di Scaling, il cui obiettivo è modificare le registrazioni per poter approssimare il più possibile lo spettro di risposta per un determinato intervallo di periodi. Recentemente è stato dimostrato come questa pratica possa condurre ad errori sistematici nei risultati se non sono definiti in maniera opportuna i parametri, quali l' accelerazione di picco (PGA) o un' altra accelerazione spettrale, utilizzati come riferimento per scalare gli accelerogrammi (Luco e Bazzurro, 2007).

La compatibilità tra lo spettro ottenuto dagli accelerogrammi scelti e quello di isoprobabile (fornito dalla normativa o calcolato tramite la PSHA) può essere quantificata tramite parametri già esistenti in letteratura come ad esempio il D_{rms} (Ambrasey e altri, 2004) o la average spectrum deviation δ (Iervolino, Galasso e Cosenza, 2009).

Il D_{rms} , root-mean-square difference, è calcolato tramite la relazione:

$$D_{rms} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{Sa_0(T_i)}{PGA_0} - \frac{Sa_s(T_i)}{PGA_s} \right)^2}$$

dove N è il numero di periodi per i quali è definita l'ordinata spettrale, $Sa_0(T_i)$ è la pseudoaccelerazione corrispondente all' i -esimo periodo dello spettro reale mentre $Sa_s(T_i)$ è la pseudoaccelerazione di riferimento calcolata per lo stesso periodo. PGA_0 e PGA_s sono rispettivamente le accelerazioni al suolo di picco dello spettro reale e di quello di riferimento. Secondo gli autori l'introduzione di questo parametro permette di selezionare gli spettri (e quindi le registrazioni) che non si discostano in maniera significativa da quello di riferimento.

Questa formulazione è stata successivamente rivista da Beyer e Bommer (2007) per ottenere un parametro in grado di valutare la compatibilità in corrispondenza dell'intervallo di periodi di interesse progettuale:

$$D_{rms} = \sqrt{\frac{1}{k-j+1} \sum_{i=j}^k (\alpha Sa_R(T_i) - Sa_T(T_i))^2}$$

Per ogni registrazione è stato introdotto un fattore di scala α , calcolato per minimizzare la distanza tra lo spettro medio scalato degli accelerogrammi reali (Sa_R) e lo spettro target (Sa_T). T_j e T_k sono gli estremi dell'intervallo di periodi per il quale si richiede la compatibilità.

In alternativa lo scostamento tra l'ordinata spettrale reale e quella di riferimento può essere normalizzato dividendolo per Sa_T associato ad ogni periodo:

$$D_{rms} = \sqrt{\frac{1}{k-j+1} \sum_{i=j}^k \left(\frac{\alpha Sa_R(T_i) - Sa_T(T_i)}{Sa_T(T_i)} \right)^2}$$

Iervolino, Galasso e Cosenza hanno proposto un'espressione diversa per misurare la deviazione dello spettro medio del gruppo di registrazioni selezionate rispetto a quello di riferimento:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Sa_{0,med}(T_i) - Sa_{REF}(T_i)}{Sa_{REF}(T_i)} \right)^2}$$

dove $Sa_{0,med}(T_i)$ è la pseudoaccelerazione media in corrispondenza del periodo T_i .

Queste procedure, proposte inizialmente per valutare la compatibilità con lo spettro di risposta isoprobabile, risultano valide anche se si considerano altri spettri di riferimento.

Ulteriori criteri di scelta si basano sulla definizione di opportune misure di intensità dello scuotimento sismico (Tothong e Luco, 2007). Esse sono parametri, normalmente scalari, che descrivono in maniera sintetica le caratteristiche dello scuotimento e che hanno la proprietà di essere ben correlate con il parametro di risposta strutturale non lineare d'interesse (ad esempio il massimo spostamento di interpiano). La formulazione di misure d'intensità con opportune caratteristiche di efficienza, sufficienza e robustezza, consente di definire criteri di scelta per le registrazioni accelerometriche, i quali permettono di valutare sia la risposta strutturale media che la sua distribuzione di probabilità e che possono pertanto essere particolarmente utili nell'ambito di procedure probabilistiche di analisi del rischio.

In alternativa alla compatibilità spettrale può essere usata un'altra procedura per la selezione degli accelerogrammi basata sul confronto tra due superfici, una definita a partire dalla massima risposta strutturale non lineare, espressa in termini di spostamento e l'altra di riferimento (Shantz, 2006).

2. Analisi di pericolosità sismica

Il principale obiettivo della progettazione in zona sismica è ottenere strutture che possano resistere a sismi considerevoli senza subire danni eccessivi.

Cosa si intenda per "danni eccessivi" dipende dalla tipologia di struttura che si sta considerando, cioè dalla classe d'uso dell'edificio. Per edifici residenziali, per esempio, risulta tollerabile un danno di entità maggiore rispetto a quello ammissibile per una struttura con funzioni strategiche come un ospedale, poiché in questo caso un'interruzione del servizio causerebbe grandi disagi.

Per quanto riguarda l'identificazione del sisma al quale la struttura dovrà resistere, questa si ottiene attraverso l'analisi di pericolosità sismica o seismic hazard analysis, che è una procedura in grado di quantificare i parametri che descrivono il "terremoto di progetto" in un dato sito.

Questa analisi può essere fatta seguendo due approcci diversi, il primo deterministico ed il secondo probabilistico.

La deterministic seismic hazard analysis (DSHA) può essere schematicamente descritta in poche fasi: in primo luogo viene definita la geometria e la sismicità di ogni zona sismogenetica, vengono definite le distanze tra il sito in esame e tutte le zone sorgenti (in genere si considera la distanza calcolata tra il sito e il punto della sorgente più vicino a quest'ultimo), viene quindi scelto il sisma di progetto, cioè quello che verrà utilizzato ai fini progettuali. Esso può essere selezionato a partire, per esempio, dai terremoti di magnitudo massima avvenuti negli ultimi 100 anni in ogni zona sismogenetica oppure dai massimi terremoti che si pensa possano avvenire sulla base di studi geologici nelle

stesse zone. La scelta del sisma di riferimento, o sisma di progetto, viene effettuata confrontando gli scuotimenti al livello del suolo nel sito in esame originati dai terremoti massimi relativi ad ogni zona sorgente, ipotizzando che questi si verifichino alla minima distanza dal sito in esame. A questo scopo vengono introdotte le relazioni di attenuazione, relazioni empiriche che permettono di valutare i parametri che descrivono il moto del suolo in un qualsiasi punto nota la sua distanza dall'origine del sisma.

Il terremoto di riferimento risulta perciò determinato da una magnitudo e da una distanza.

La pericolosità sismica viene a questo punto definito da uno o più parametri rappresentativi degli scuotimenti del terreno causati dal sisma di progetto, come per esempio la peak ground acceleration (PGA) o la peak ground velocity (PGV).

Nella probabilistic seismic hazard analysis (PSHA), invece, le probabilità associate al verificarsi di ogni possibile scenario sismico caratterizzato da una propria magnitudo e distanza vengono combinate al fine di calcolare la pericolosità sismica di un determinato luogo.

In questo caso l'analisi si sviluppa nelle seguenti fasi: inizialmente vengono individuate le zone sismogenetiche e all'interno di ogni zona deve essere definita la distribuzione probabilistica della sua sismicità. In genere questa viene assunta costante e ciò equivale a dire che in ogni punto della sorgente si ha la stessa probabilità che si verifichi un sisma. Ad ogni area sorgente viene poi associata una legge di ricorrenza, cioè una relazione ottenuta dalla regressione dei dati reali che associa ad ogni magnitudo il tasso di occorrenza medio ovvero il numero di sismi annui ai quali corrisponde una magnitudo almeno pari a quella considerata. Relazioni di attenuazione vengono in seguito sviluppate per studiare la propagazione dell'evento sismico a partire

da ciascuna zona sismogenetica fino al sito in esame. Esse permettono di prendere in considerazione sismi caratterizzati da tutte le possibili combinazioni di magnitudo e distanza. Infine le informazioni relative ad ogni area sorgente vengono combinate e viene quantificata la probabilità che uno o più parametri rappresentativi del moto del suolo superino un determinato valore di soglia nel luogo oggetto di studio dati tutti i possibili sismi.

In questa tesi l'analisi di pericolosità sismica è stata sviluppata seguendo l'approccio probabilistico avvalendosi del programma CRISIS2007, versione 7.2, sviluppato presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università Nazionale Autonoma del Messico.

L'analisi è stata effettuata considerando strutture molto semplici, degli oscillatori ad un grado di libertà con comportamento elastico lineare e diversi periodi propri di vibrazione, situati nel luogo scelto per lo studio. Successivamente l'analisi è stata ripetuta associando agli oscillatori un materiale elastoplastico incrudente e facendo variare il fattore di struttura q da 1 a 5, cioè ipotizzando che la forza di snervamento oltre la quale comincia il comportamento plastico sia q volte più piccola rispetto alla forza agente nel caso di comportamento elastico lineare. In altre parole, si vuole studiare il comportamento dell'oscillatore al variare del suo grado di plasticizzazione poiché la struttura associata a $q=1$ avrà un comportamento molto simile a quella elastica mentre per $q=5$ la struttura presenterà un'ampia escursione in campo plastico.

Per poter descrivere la pericolosità sismica nel caso del sistema elastico si introduce la pseudoaccelerazione, definita dalla relazione:

$$psa(T) = X_{\max}(T) \cdot \omega^2(T)$$

dove $X_{\max}(T)$ è lo spostamento massimo della struttura e ω è la frequenza relativa allo stesso periodo. Si noti che moltiplicando la psa per la massa della

struttura si ottiene la massima forza statica equivalente, cioè quella forza elastica che se applicata all'oscillatore produce uno spostamento pari a quello massimo indotto dal sisma. Per questo motivo la psa è una grandezza idonea a rappresentare le sollecitazioni causate del sisma sulla struttura. Per cogliere il comportamento plastico del sistema si usa invece lo spostamento massimo dell'oscillatore, parametro in grado di indicare l'entità delle deformazioni permanenti.

L'utilizzo del software ha permesso di calcolare per ogni periodo fondamentale il relativo valore di pseudoaccelerazione, nel caso elastico, e di spostamento massimo, nel caso plastico, associati ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni, ovvero gli spettri isoprobabili corrispondenti ad un periodo di ritorno di 475 anni in termini di psa prima e X_{max} poi.

Indipendentemente dal modello di struttura utilizzato, è stato necessario definire alcuni parametri e relazioni empiriche da fornire come input al software: tali dati sono in grado di caratterizzare la sismicità del sito in esame.

La procedura seguita può essere sintetizzata nelle 8 fasi elencate e descritte di seguito:

- definizione delle classi di magnitudo;
- scelta del catalogo sismico di riferimento;
- definizione del luogo oggetto dell'analisi di pericolosità sismica;
- zonazione sismogenetica;
- parametrizzazione delle leggi di ricorrenza;
- scelta delle ordinate spettrali (diverse nel caso elastico e plastico);
- definizione delle relazioni di attenuazione (diverse nel caso elastico e plastico);
- imposizione dei parametri per l'integrazione.

1. definizione delle classi di magnitudo facendo riferimento alla suddivisione in classi esposta nel Rapporto Conclusivo per la Redazione della Mappa di Pericolosità Sismica redatto dall'Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia, si dividono gli eventi sismici in 12 gruppi:

N	Magnitudo
1	4.76±0.115
2	4.99±0.115
3	5.22±0.115
4	5.45±0.115
5	5.68±0.115
6	5.91±0.115
7	6.14±0.115
8	6.37±0.115
9	6.60±0.115
10	6.83±0.115
11	7.06±0.115
12	7.29±0.115

Tabella 1: classi di magnitudo.
Alla classe 12 appartiene anche un sisma di magnitudo 7.41.

2. scelta del catalogo sismico di riferimento il catalogo utilizzato è chiamato Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani 04 (CPTI04) e raccoglie le informazioni relative ai sismi avvenuti in Italia e nelle zone limitrofe (purché di entità significativa) dal 217 a.C. al 2002. Una delle ipotesi alla base della PSHA è l'indipendenza degli eventi sismici, per questo motivo il catalogo oltre ad essere completo non contiene le "repliche", ovvero scosse registrate entro 90 giorni e 30km rispetto a quella principale.

Nella tabella seguente sono riportati gli intervalli di completezza statistici denominati CO-04.4, sono cioè elencati gli anni a partire dai quali il catalogo può essere ritenuto completo, per ogni zona sismogenetica e classe di magnitudo.

classi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ZS												
901	1910	1871	1871	1700	1700	1530	1530	1300	1300	1300	1300	1300
902	1910	1871	1871	1700	1700	1530	1530	1300	1300	1300	1300	1300
903	1910	1871	1871	1700	1700	1530	1530	1300	1300	1300	1300	1300
904	1910	1871	1871	1700	1700	1530	1530	1300	1300	1300	1300	1300
905	1910	1871	1871	1700	1700	1530	1530	1400	1400	1300	1300	1300
906	1910	1871	1871	1700	1700	1530	1530	1400	1400	1300	1300	1300
907	1910	1871	1871	1700	1700	1530	1530	1400	1400	1300	1300	1300
908	1910	1871	1871	1700	1700	1530	1530	1300	1300	1300	1300	1300
909	1910	1871	1871	1700	1700	1530	1530	1300	1300	1300	1300	1300
910	1910	1871	1871	1700	1700	1530	1530	1300	1300	1300	1300	1300
911	1910	1871	1871	1700	1700	1530	1530	1300	1300	1300	1300	1300
912	1910	1871	1871	1700	1700	1530	1530	1400	1400	1300	1300	1300
913	1910	1871	1871	1700	1700	1530	1530	1400	1400	1300	1300	1300
914	1910	1871	1871	1700	1700	1530	1530	1400	1400	1300	1300	1300
915	1920	1871	1871	1700	1700	1700	1530	1530	1300	1300	1300	1300
916	1920	1871	1871	1700	1700	1700	1530	1530	1300	1300	1300	1300
917	1920	1871	1871	1700	1700	1700	1530	1530	1300	1300	1300	1300
918	1920	1871	1871	1700	1700	1700	1530	1530	1300	1300	1300	1300
919	1920	1871	1871	1700	1700	1530	1530	1300	1300	1300	1300	1300
920	1920	1871	1871	1700	1700	1700	1530	1530	1300	1300	1300	1300
921	1920	1871	1871	1700	1700	1700	1530	1530	1300	1300	1300	1300
922	1920	1871	1871	1700	1700	1700	1530	1530	1300	1300	1300	1300
923	1920	1871	1871	1700	1700	1700	1530	1530	1530	1300	1300	1300
924	1920	1895	1895	1787	1787	1530	1530	1530	1530	1400	1400	1400
925	1920	1895	1895	1787	1787	1530	1530	1530	1530	1400	1400	1400
926	1920	1895	1895	1787	1787	1530	1530	1530	1530	1400	1400	1400
927	1920	1895	1895	1787	1787	1530	1530	1530	1530	1400	1400	1400
928	1920	1895	1895	1787	1787	1530	1530	1530	1530	1300	1300	1300
929	1920	1895	1895	1787	1787	1787	1787	1530	1530	1400	1400	1400
930	1920	1895	1895	1787	1787	1787	1787	1530	1530	1400	1400	1400
931	1950	1950	1950	1787	1787	1787	1787	1530	1530	1530	1530	1530
932	1920	1895	1895	1700	1700	1700	1700	1450	1450	1450	1450	1450
933	1920	1895	1895	1700	1700	1700	1700	1450	1450	1450	1450	1450
934	1920	1895	1895	1700	1700	1700	1530	1530	1300	1300	1300	1300
935	1920	1895	1895	1700	1700	1700	1700	1450	1450	1450	1450	1450
936	1920	1895	1895	1700	1700	1700	1700	1450	1450	1450	1450	1450

Tabella 2: intervalli di completezza CO-04

3. definizione del luogo oggetto dell'analisi di pericolosità sismica: può essere scelto un punto o una griglia di punti. Per questo studio si è scelto di analizzare una località situata nella provincia di Bologna identificata dalle coordinate: 11.1°est, 44.3°nord.
4. zonazione sismogenetica il territorio nazionale è suddiviso in 36 zone di forma poligonale i cui vertici sono individuati da una latitudine e una longitudine (ZS9). L'Appendice 2 del Rapporto Conclusivo riporta anche una stima della profondità "efficace" di ogni zona, cioè la profondità alla quale si originano la maggior parte dei sismi dell'area sorgente. La sismicità all'interno di ogni zona è assunta costante.
5. parametrizzazione delle leggi di ricorrenza come già accennato, le leggi di ricorrenza associano ad ogni magnitudo una frequenza di superamento annuale e in questo modo viene caratterizzata la sismicità di ogni zona sorgente. La distribuzione dei dati provenienti del catalogo, se graficata su un piano semilogaritmico, appare seguire un andamento lineare, per questo motivo si è scelto di approssimare i punti con la relazione proposta da Gutenberg e Richter che in questo piano è una retta:

$$\log_{10}\lambda(m)=a-bm$$

dove $\lambda(m)$ è il numero di eventi annui di magnitudo almeno pari a m , a è il tasso di sismicità totale della regione e b è una costante che rappresenta la pendenza della retta, cioè la variazione della frequenza con la magnitudo.

Per poter ottenere le leggi di ricorrenza associate ad ognuna delle zone sismogenetiche è stato necessario dividere i sismi riportati nel catalogo secondo la loro zona d'origine. Inoltre da tutti i gruppi sono stati scartati i terremoti che risalgono a periodi al di fuori dell'intervallo di completezza associato. A questo punto è stato possibile stabilire per ogni ZS la magnitudo minima registrata ($M_0=4.65$

per ogni regione ad eccezione della ZS 922 dove $M_0=4.88$) e il relativo tasso di superamento $\lambda(M_0)$. Questo è stato calcolato dividendo il numero di sismi afferenti alle singole classi di magnitudo per l'intervallo temporale in cui il catalogo è ritenuto completo e infine sommando i 12 contributi così valutati.

ZS	$\lambda(M_0)$	ZS	$\lambda(M_0)$	ZS	$\lambda(M_0)$
901	0.077474432	913	0.23103582	925	0.092062083
902	0.075110424	914	0.200354465	926	0.07323786
903	0.083720544	915	0.374159892	927	0.312743734
904	0.062056695	916	0.084447875	928	0.054185994
905	0.399409351	917	0.156407171	929	0.31280746
906	0.185257373	918	0.230503932	930	0.106112808
907	0.074087893	919	0.280774634	931	0.045231345
908	0.12418867	920	0.26323856	932	0.105443235
909	0.069765563	921	0.240816206	933	0.159046823
910	0.061428072	922	0.060057631	934	0.039165941
911	0.058820717	923	0.587244548	935	0.096997351
912	0.074184394	924	0.212585723	936	0.083314338

Tabella 3: tassi di superamento annui di M minima (sismi/anno)

La relazione magnitudo-frequenza annua viene costruita per punti in un piano in cui le ascisse sono le magnitudo e le ordinate sono i tassi di superamento cumulati, espressi attraverso il loro logaritmo naturale. I dati vengono quindi approssimati con una retta. Ripetendo questo procedimento per ogni zona si ottengono i 36 valori di b (la pendenza delle rette interpolanti calcolata in forma logaritmica) e i relativi coefficienti di variazione logaritmici.

Si sottolinea che in CRISIS vanno inseriti i valori assoluti delle pendenze così calcolate.

ZS	b (ln)	CV (ln)	ZS	b (ln)	CV (ln)	ZS	b (ln)	CV (ln)
901	-2.8885	0.762009	913	-3.4861	0.102658	925	-1.7416	1.311723
902	-2.4131	0.430906	914	-2.8492	0.199561	926	-3.6999	1.076995
903	-2.4131	0.430906	915	-3.2869	0.721007	927	-1.6662	0.696354
904	-3.2983	0.891022	916	-3.6292	0.499382	928	-1.6587	0.552118
905	-2.434	0.387867	917	-2.3168	0.185535	929	-1.8386	0.650516
906	-3.9389	0.397619	918	-2.5598	0.561406	930	-1.9916	0.495513
907	-3.8016	1.06672	919	-3.1846	0.315684	931	-1.4639	1.462832
908	-3.8375	0.167366	920	-4.5183	0.728305	932	-2.55	0.642212
909	-3.1713	0.630135	921	-4.6271	0.299233	933	-2.8606	0.355747
910	-2.5128	0.60761	922	-4.6271	0.299233	934	-2.2636	0.865097
911	-3.4014	0.743729	923	-2.4959	0.462761	935	-1.6644	0.866787
912	-2.9672	0.555671	924	-2.6443	0.712709	936	-2.3676	0.050553

Tabella 4: pendenze e coefficienti di variazione delle leggi di G-R

L'ultimo parametro che stato necessario fornire a CRISIS per la definizione della sismicità locale è la magnitudo massima. Il programma permette di considerarla come un valore statistico, tuttavia in questo lavoro di tesi tale parametro è stato assunto in modo deterministico.

In conformità con il Rapporto Conclusivo, l' M_{massima} di ogni zona è stata valutata a partire dalle magnitudo registrate e dalle magnitudo proposte su base geologica seguendo i seguenti criteri:

- se la magnitudo massima osservata è maggiore del valore centrale della rispettiva classe di M per una quantità $\geq 0.08M$ (pari ad $1/3$ della dimensione della classe stessa), M_{massima} è assunta uguale al valore della classe superiore;
- se l'evento con magnitudo massima osservata ricade al di fuori del relativo intervallo di completezza (ossia se l'evento non entra nei calcoli di pericolosità sismica), si adotta comunque, a titolo cautelativo, $M_{\text{massima}} = M_{\text{massima osservata}}$;

- se $M_{\text{massima osservata}} \leq M_{\text{massima geologica}}$, si adotta $M_{\text{massima}} = M_{\text{massima geologica}}$;
- in tutti gli altri casi $M_{\text{massima}} = M_{\text{massima osservata}}$

ZS	M_{massima}	ZS	M_{massima}	ZS	M_{massima}
901	5.91	913	5.91	925	6.83
902	6.14	914	5.97	926	5.91
903	5.91	915	6.6	927	7.06
904	5.71	916	5.52	928	5.91
905	6.66	917	6.1	929	7.29
906	6.6	918	6.37	930	6.6
907	5.9	919	6.37	931	6.9
908	5.68	920	5.68	932	6.14
909	5.68	921	5.91	933	5.91
910	6.37	922	5.68	934	6.14
911	5.68	923	7.06	935	7.41
912	6.2	924	6.83	936	5.45

Tabella 5: magnitudo massime deterministiche

A titolo d'esempio si riporta il calcolo dei parametri relativi alla ZS 919.

Numero	Anno	Magnitudo	Classe
524	1745	5.37	4
528	1747	5.93	6
535	1751	6.3	8
572	1767	5.44	4
663	1789	5.8	6
795	1832	5.8	6
822	1838	5.63	5
892	1854	5.37	4
1035	1878	5.55	4
1266	1897	5.03	2
1286	1897	5.18	3
1294	1898	5.17	3
1301	1898	5.09	2
1600	1914	5.17	3
1612	1915	5.03	2
1650	1917	5.8	6
1692	1919	5.15	3
1715	1921	4.83	1
1798	1927	4.83	1
1905	1935	4.83	1
1984	1943	4.83	1
2016	1948	5.17	3
2142	1960	4.83	1
2186	1963	4.83	1
2190	1963	4.83	1
2191	1963	5.03	2
2212	1965	4.93	2
2214	1965	4.83	1
2287	1970	4.83	1
2295	1971	4.77	1
2306	1971	4.97	2
2350	1974	4.73	1
2440	1984	5.68	5
2460	1987	4.65	1
2489	1993	4.92	2
2515	1997	6.05	7
2517	1998	5.33	3
2543	2001	5.37	4

Tabella 6: sismi originati nella ZS919

Sono stati individuati i sismi associati alla zona sismogenetica in esame e per ognuno è stata specificata la classe di magnitudo di appartenenza.

E' stato calcolato il numero di sismi avvenuti all'interno degli intervalli di completezza per ogni classe:

classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
numero sismi	12	7	6	5	2	4	1	1	0	0	0	0

Tabella 7: numero di sismi per classe

classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
catalogo completo dal:	1920	1871	1871	1700	1700	1530	1530	1300	1300	1300	1300	1300
catalogo completo al:	2002	2002	2002	2002	2002	2002	2002	2002	2002	2002	2002	2002
anni di completezza:	82	131	131	302	302	472	472	702	702	702	702	702

Tabella 8: intervalli temporali di completezza del catalogo per ogni classe di M

Successivamente il numero di sismi associati ad ogni classe è stato diviso per il numero di anni per i quali il catalogo è ritenuto completo:

classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
sismi/anni	0.1463	0.0534	0.0458	0.0166	0.0066	0.0085	0.0021	0.0014	0	0	0	0

Tabella 9: numero di sismi/anni di completezza

La somma dei 12 contributi ha fornito il tasso di sismicità totale della zona, cioè il numero di eventi annui di magnitudo almeno pari a 4.65, la magnitudo minima registrata nella ZS919. $\lambda(M_0)$ vale quindi 0.280774634.

La somma degli ultimi 11 contributi restituisce il valore del tasso di superamento cumulato riferito a terremoti di magnitudo $M=4.88$, cioè la frequenza con la quale si avvertono sismi di magnitudo non inferiore a 4.88 in un anno. Analogamente, la sommatoria degli ultimi 10 contributi fornisce il tasso di superamento associato a $M=5.11$ e così via.

classe	M _{minima}	tassi cumulati	ln(tassi cumulati)
1	4.65	0.280774634	-1.270202944
2	4.88	0.134433171	-2.006688074
3	5.11	0.080998056	-2.513330119
4	5.34	0.03519653	-3.346807789
5	5.57	0.018640238	-3.982432684
6	5.8	0.012017722	-4.421372905
7	6.03	0.003543145	-5.642740389
8	6.26	0.001424501	-6.553933404

Tabella 10: tassi di superamento cumulati annui

Come si può vedere dalla tabella 10, i valori delle frequenze di superamento sono stati anche espressi attraverso il loro logaritmo naturale. Le motivazioni di questa trasformazione saranno chiarite in seguito.

Questi tassi sono stati rappresentati su un piano semi-logaritmico in funzione della magnitudo minima alla quale sono riferiti ed è stata individuata l'equazione della retta che approssima i dati:

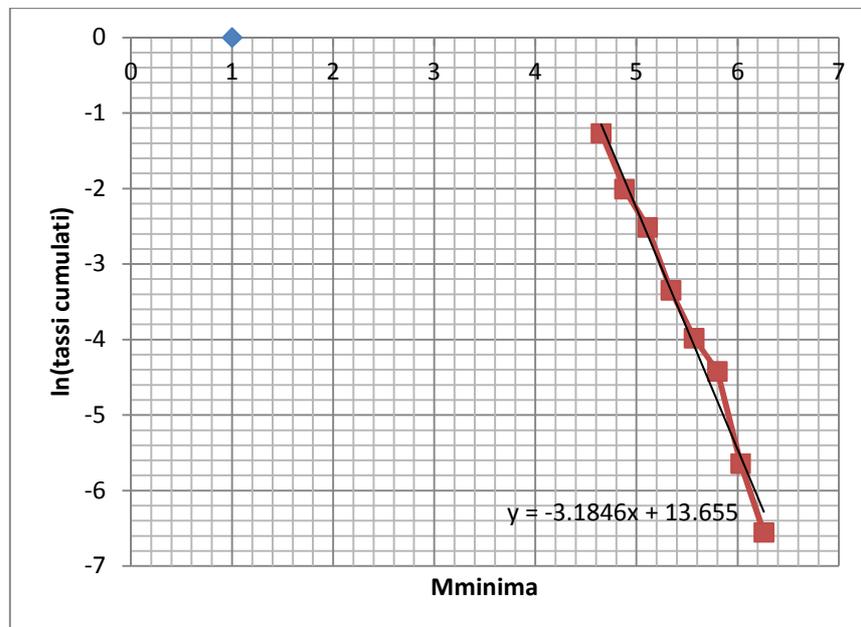


Figura 1: frequenze di superamento annue in funzione della magnitudo

La pendenza della retta vale -3.1846. Questa è il parametro chiamato b o β da inserire in CRISIS e il programma richiede esplicitamente che il valore sia calcolato a partire dal logaritmo naturale dei tassi cumulati.

Sono state calcolate le singole pendenze dei 7 tratti individuabili sul grafico ed è stata valutata la loro deviazione standard rispetto alla pendenza b. Infine è stato possibile valutarne il coefficiente di variazione di b, CV.

pendenza 1	-3.202109258
pendenza 2	-2.202791502
pendenza 3	-3.623815955
pendenza 4	-2.763586502
pendenza 5	-1.908435742
pendenza 6	-5.31029341
pendenza 7	-3.96170876

Tabella 11: pendenze locali

σ	1.005328506
CV	0.315684389

Source number 19 of 36 total sources

Source name 919

Occurrence model: Poisson, Characteristic

Draw options: Active, Map, All

Longitude 12.35841, Latitude 43.100227

Poisson Model

Threshold magnitude (M0) 4.65

Lambda(M0) 0.280775

Expected value of Beta 3.1846

Coefficient of variation of Beta 0.315684389

Parameters defining Mu:

Untruncated expected value 6.37

Untruncated standard deviation 0

Lower limit (M1) 6.37

Upper limit (M2) 6.37

Buttons: View summary, Exit

Se fino a questo punto la procedura era la stessa per ogni modello di struttura analizzato, negli ultimi 2 punti si devono distinguere i due casi: oscillatori elastici e oscillatori plastici

6. scelta delle ordinate spettrali per gli oscillatori elastici lineari sono stati presi in considerazione 75 periodi propri di vibrazione in un range che va da 0 a 5 secondi. Tramite la PSHA si intende valutare lo spettro di risposta elastico associato ad una determinata probabilità di superamento, quindi, per ognuno dei periodi definiti, CRISIS è in grado di calcolare i valori di pseudoaccelerazione (l'ordinata spettrale) corrispondenti a vari tassi di superamento annui. E' necessario inserire nel programma il range di pseudoaccelerazioni da usare nell'analisi (si noti che in questo modo vengono definite indirettamente la frequenza annua minima e massima considerate). L'intervallo di psa deve essere stabilito in modo da contenere il valore dell'ordinata spettrale associata alla probabilità di superamento scelta per la progettazione. Infine deve essere indicato il numero di step con il quale suddividere il range di frequenze considerato.

Dividere l'intervallo in un numero elevato di sottointervalli favorisce una valutazione accurata di psa, ma poiché aumentare il numero di passi fa aumentare anche il tempo necessario per svolgere l'analisi, le frequenze sono state suddivise in 30 sottointervalli, un buon compromesso tra onere computazionale e accuratezza del risultato.

Per quanto riguarda gli oscillatori elasto-plastici, l'ordinata spettrale è lo spostamento massimo della struttura e i periodi analizzati sono stati 5, selezionati a partire dallo spettro elastico isoprobabile in modo da tenere in considerazione le combinazioni di periodo e psa più significative. Il primo periodo scelto è molto basso (0.1s), il secondo (0.3s) corrisponde ad un picco della pseudoaccelerazione che diminuisce rapidamente, come si vede dal valore di psa associato al

terzo periodo, 0.5s. Gli ultimi due valori sono 1s e 2s. L'intervallo di frequenze e il numero di passi in cui questo viene suddiviso sono stati determinati in modo analogo al caso precedente.

E' da notare che CRISIS è in grado di gestire al massimo 40 ordinate spettrali, per questo motivo il calcolo dello spettro elastico è stato frutto di due analisi: nella prima si sono presi in considerazione i 40 periodi iniziali (da $T=0s$ a $T=0.65s$), nella seconda i restanti 35 (da $T=0.7s$ a $T=5s$).

Spectral ordinates

Total number of spectral ordinates	40
Actual spectral ordinate	1
Structural period of actual spectral ordinate	0
Lower limit of intensity level	0.001
Upper limit of intensity level	6
Units	m/s ²

Number of levels of intensity for which seismic hazard will be computed

30

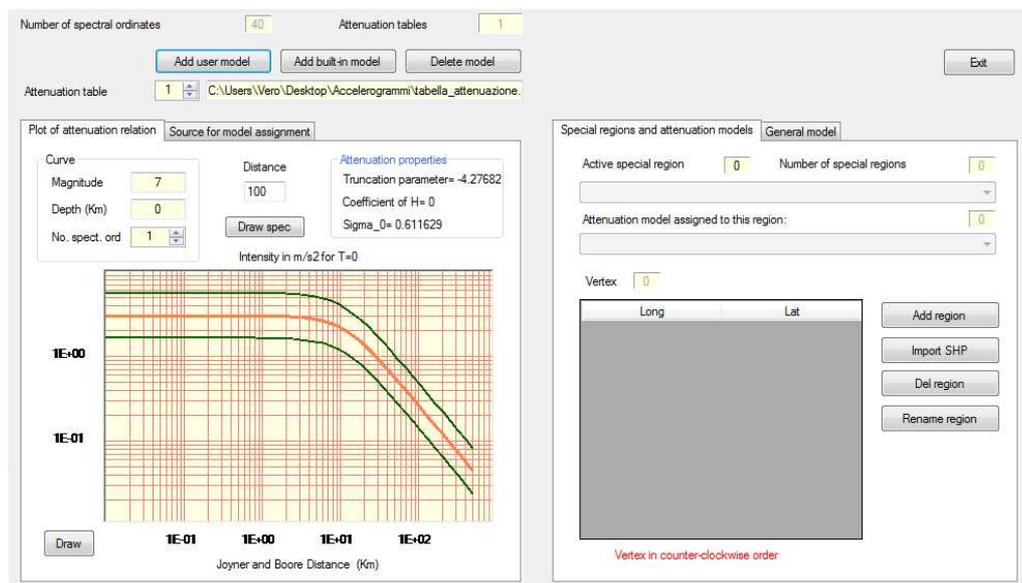
Exit

7. definizione delle relazioni di attenuazione questi modelli permettono di studiare la variazione del valore dell'ordinata spettrale associata ad un certo periodo fondamentale con la distanza dal punto in cui si è originato il sisma, una volta fissata l'intensità del terremoto alla sorgente tramite la sua magnitudo. Sono ottenute effettuando una regressione a partire da dati reali. In letteratura sono state proposte numerose formulazioni per queste relazioni ed esse differiscono per il numero di coefficienti che vi compaiono, per il database di registrazioni utilizzato e per come vengono tenute in considerazione le condizioni geologiche locali.

Effettuando l'analisi di pericolosità sismica presentata si è scelto di ricavare una legge di attenuazione "ad hoc" per questo studio. Come già accennato, infatti, lo spettro di risposta ottenuto dalla PSHA verrà usato come riferimento per definire alcuni criteri di scelta di gruppi di accelerogrammi reali. Questi verranno applicati in set di 7 alle strutture esaminate e in media dovranno risultare spettrocompatibili per un certo range di periodi.

Perché lo studio risultasse coerente e poter quindi verificare la validità dei criteri di selezione proposti, è stato necessario definire una relazione di attenuazione che partisse dagli stessi accelerogrammi che sono stati successivamente applicati agli oscillatori semplici.

La definizione di questa relazione di attenuazione si è rivelata uno degli aspetti più delicati affrontati durante la tesi e per questo motivo vale la pena trattarla a parte nel capitolo successivo.



8. imposizione dei parametri per l'integrazione CRISIS necessita che siano determinate le seguenti grandezze:

- 250 km è la distanza massima dal punto in esame che divide le zone sismogenetiche considerate nel processo di integrazione

da quelle troppo lontane per poter contribuire in modo significativo alla definizione del rischio sismico e che per questo vengono ignorate. ;

- 2 km è la dimensione minima dei triangoli in cui ogni area sorgente viene discretizzata: questa dimensione caratteristica è la radice quadrata dell'area dei triangolini;
- il rapporto tra la distanza sorgente-sito e la dimensione caratteristica viene posto uguale a 1. Il software continua a suddividere le zone finché questo rapporto assume un valore maggiore di quello specificato;
- Cinque periodi di ritorno per i quali può essere generato un file per la rappresentazione tridimensionale del valore di una fissata ordinata spettrale sul territorio italiano associata ai periodi di ritorno selezionati. Questo tipo di file non è stato ritenuto utile ai fini della tesi e quindi non è stato utilizzato;
- la distanza usata per la disaggregazione in termini di magnitudo e distanza è la stessa a cui si fa riferimento in tutto lo studio. Si tratta della distanza di Joyner-Boore, indicata con R_{JB} , cioè la minima distanza dalla proiezione verticale del piano di faglia sulla superficie terrestre.

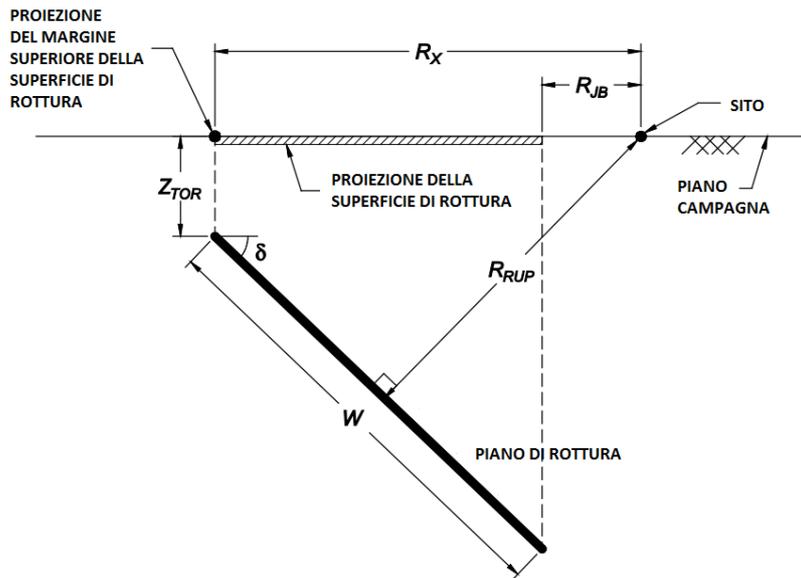


Figura 2: distanza di Joyner-Boore (da Kaklamanos, Baise e Boore, 2011)

La PSHA fornisce, per ogni periodo proprio di vibrazione della struttura analizzata, i valori dell'ordinata spettrale associata a diverse frequenze di superamento annue. Fissato dunque un periodo di ritorno e ripetendo l'analisi per tutti i periodi, si ottiene lo spettro di risposta elastico isoprobabile.

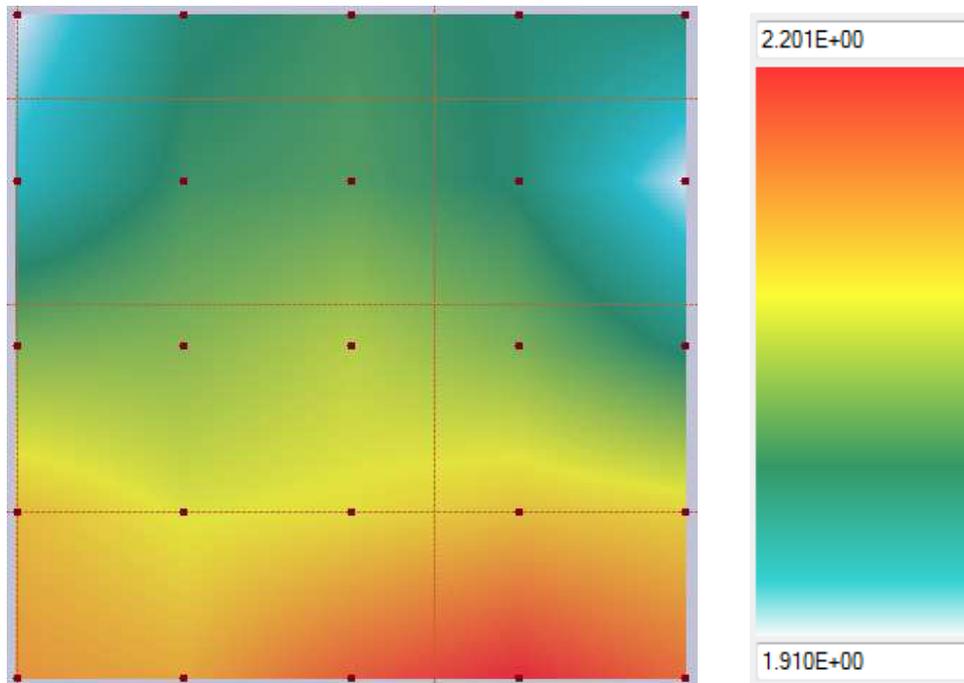


Figura 3: PGA per un periodo di ritorno di 475 anni, valori in m/s^2

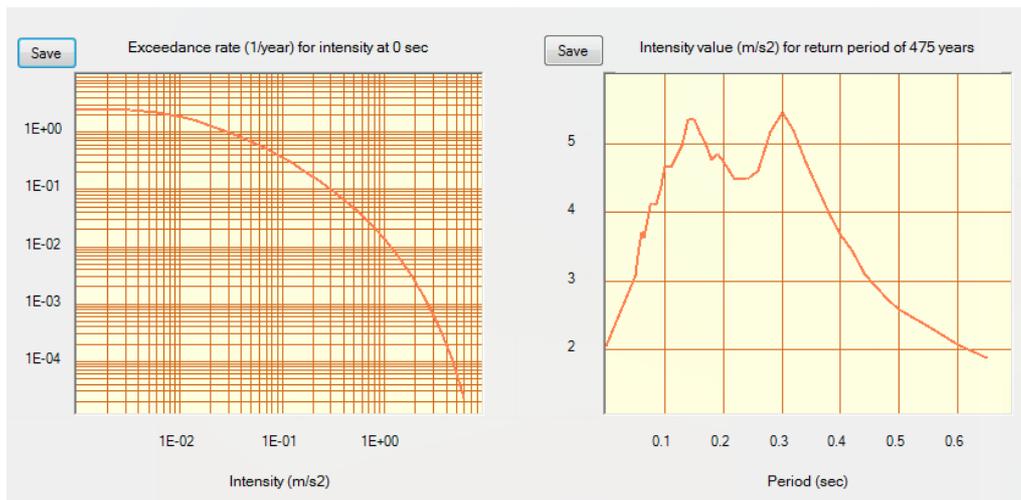


Figura 4: schermata dei risultati di CRISIS

La disaggregazione può essere calcolata dal software e permette di individuare quello scenario sismico, caratterizzato da magnitudo e distanza, che influenza maggiormente la pericolosità sismica del sito oggetto di studio.

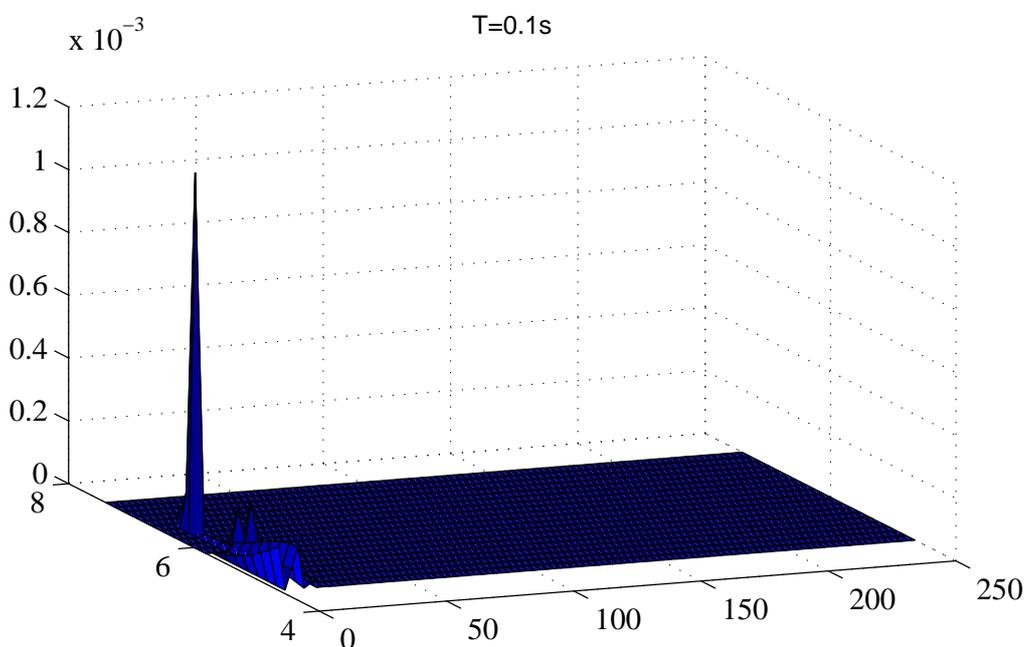


Figura 5: disaggregazione della pericolosità sismica per un tempo di ritorno di 475 anni; la magnitudo è stata suddivisa in 20 intervalli mentre la distanza in 100

3. Relazioni di attenuazione

1. Definizione del catalogo accelerometrico

Le relazioni di attenuazione sono state ricavate a partire dalle registrazioni dei sismi contenuti nell'NGA Database, un catalogo sismico sviluppato dal Pacific Earthquake Engineering Research Center. Esso contiene 3551 registrazioni di terremoti, oltre ad una serie di informazioni aggiuntive (dette meta-dati) che permettono di identificare univocamente i sismi.

Le registrazioni sono state preselezionate sulla base della disponibilità di alcune informazioni; tra queste, i dati che sono stati ritenuti più significativi ai fini dello studio sono:

- il numero che identifica il terremoto (eqID) e quello che identifica la registrazione (Record Sequence Number), poichè lo stesso sisma può essere avvertito in più stazioni;
- il nome della time history, perché questo permette di riconoscere quale tra le due componenti orizzontali tra loro ortogonali viene considerata;
- il numero di riconoscimento della stazione che rileva il sisma;
- la magnitudo, la distanza di Joyner e Boore e quella epicentrale;
- Il meccanismo di rottura;
- la frequenza minima utilizzabile per ogni componente: questo dato individua la frequenza al di sotto della quale la time history non è più attendibile;

- la classificazione del tipo di terreno sottostante la stazione di registrazione basata sulla $V_{S,30}$, e la $V_{S,30}$, stessa;
- un parametro denominato isPulse che vale 1 se la stazione di registrazione è molto vicina all'origine del sisma e per questo motivo lo percepisce come un unico ampio impulso (fling), vale 0 altrimenti.

Le registrazioni senza tali informazioni sono state scartate.

2. Relazioni di attenuazione per l'oscillatore elastico

Per trovare le relazioni di attenuazione in termini di pseudoaccelerazione, per prima cosa sono state applicate tutte le time histories, cioè le registrazioni delle accelerazioni nel tempo, provocate da un sisma lungo le direzioni N-S, E-W, ad un gruppo di 74 oscillatori elastici lineari, ognuno caratterizzato da un periodo proprio di vibrazione diverso. Da questa analisi sono stati ottenuti i valori di pseudoaccelerazione (psa), pseudovelocità (psv) e spostamento (sd) per i periodi considerati e per ogni time history. La PGA, peak ground acceleration, è stata individuata per entrambe le componenti orizzontali di ogni registrazione cercando il massimo del valore assoluto dell'accelerazione. Essa può essere intesa come la pseudoaccelerazione indotta dal sisma su un corpo rigido e quindi come psa corrispondente al periodo $T=0$ s. I periodi coinvolti nell'analisi, 75 in tutto, sono quelli elencati:

0	0.05	0.055	0.06	0.065	0.07	0.075	0.08	0.085	0.09	0.095	0.1	0.11	0.12	0.13
0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.2	0.22	0.24	0.26	0.28	0.3	0.32	0.34	0.36
0.38	0.4	0.42	0.44	0.46	0.48	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9
0.95	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2	2.1	2.2	2.3
2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3	3.25	3.5	3.75	4	4.25	4.5	4.75	5

Tabella 12: periodi degli oscillatori elastici

Per ogni periodo sono stati utilizzati solo gli accelerogrammi ai quali era associata una Lowest usable frequency adeguata mentre sono state eliminate le time histories alle quali non era associata la distanza di Joyner-Boore o la $V_{S,30}$. Sono state scartate inoltre 10 registrazioni per le quali non è stata trovata una corrispondenza tra Record Sequence Number dei meta-dati e delle time histories e quelle per le quali il sisma è stato percepito come un impulso.

Con l'ausilio di Matlab è stato creato un file di testo nel quale riportare il catalogo sismico così rielaborato.

Questo file è stato successivamente importato in R, un linguaggio di programmazione per le analisi statistiche, e, considerando un'ordinata spettrale alla volta, i dati sono stati elaborati. R ha permesso di studiare il legame esistente tra la pseudoaccelerazione relativa ad un determinato periodo T (la variabile dipendente) e la magnitudo, la distanza e le caratteristiche del terreno (tramite la $V_{S,30}$) assunte come variabili indipendenti.

Il legame funzionale adottato è quello riportato:

$$\log_{10} \text{psa}(T) = c_1 + c_2 \cdot M + c_3 \cdot (M - 6)^2 + (c_4 + c_5 \cdot M) \cdot \log_{10} \left(\sqrt{R^2 + c_6^2} \right) + c_7 \cdot \log_{10}(V_{S,30})$$

dove i coefficienti $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7$ sono stati calcolati tramite la regressione non lineare per ogni T. È importante sottolineare che la stessa procedura ha fornito, per tutte le ordinate spettrali, 3 parametri in grado di quantificare la dispersione dei dati. Si tratta di 3 deviazioni standard, espresse anch'esse in forma logaritmica, legate rispettivamente alle due componenti, alle registrazioni dello stesso evento e ai diversi sismi (facendo la regressione per ogni singolo terremoto questa componente di aleatorietà sarebbe nulla). I

tre valori di σ sono stati combinati per costituire un'unica variabile che tenesse conto in modo complessivo delle tre fonti d'errore:

$$\sigma(T) = \sqrt{\sigma_{\text{sisma}}^2 + \sigma_{\text{registrazione}}^2 + \sigma_{\text{componente}}^2}$$

CRISIS richiede esplicitamente che la deviazione standard venga fornita nella definizione delle relazioni di attenuazione in termini di logaritmo naturale quindi, per motivazioni legate esclusivamente al software utilizzato nella fase successiva, σ è stato valutato come segue:

$$\sigma(T) = \frac{\sqrt{\sigma_{\text{sisma}}^2 + \sigma_{\text{registrazione}}^2 + \sigma_{\text{componente}}^2}}{\log_{10}e}$$

Per verificare la validità del modello di regressione proposto sono stati effettuati alcuni test, dei quali è riportata la rappresentazione grafica (l'ordinata spettrale considerata è la PGA).

Il parametri più indicati per svolgere questo tipo di controlli sono i residui standardizzati perché essi sono rappresentativi della differenza tra le pseudoaccelerazioni associate ad ogni registrazione e i corrispondenti valori di psa previsti dalla relazione di attenuazione.

Affinché il legame funzionale possa essere ritenuto soddisfacente la distribuzione dei residui non deve seguire andamenti particolari, infatti l'individuazione di una tendenza marcata suggerisce la presenza di un'ulteriore correlazione tra la variabile dipendente e le variabili indipendenti fino a questo momento trascurata. Per questo motivo i residui sono stati graficati in funzione del sisma, della magnitudo, della distanza e del tipo di suolo ai quali sono riferiti in cerca di eventuali correzioni da apportare alla relazione di attenuazione ipotizzata. Non essendo stati evidenziati andamenti "sospetti", la legge proposta è stata adottata.

Un'ulteriore prova di quanto appena esposto è stata ottenuta dividendo i valori dei residui (sempre considerati con il loro valore standardizzato) secondo il meccanismo di rottura associato. Il valori medi degli elementi appartenenti ad ogni gruppo si sono rivelati estremamente simili e questo ha permesso di concludere che i residui non dipendono dal tipo di rottura.

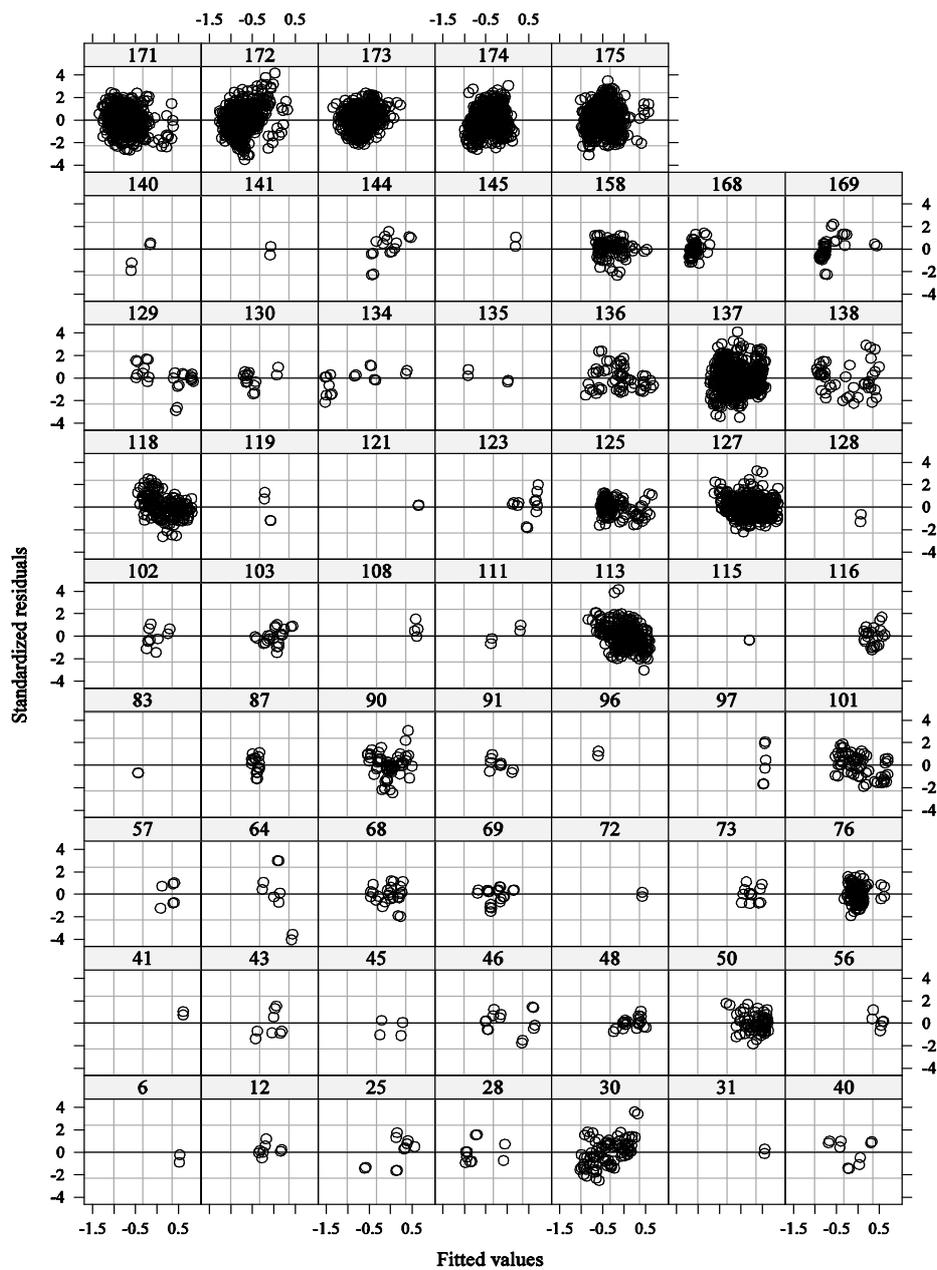


Figura 6: residui standardizzati suddivisi per terremoto

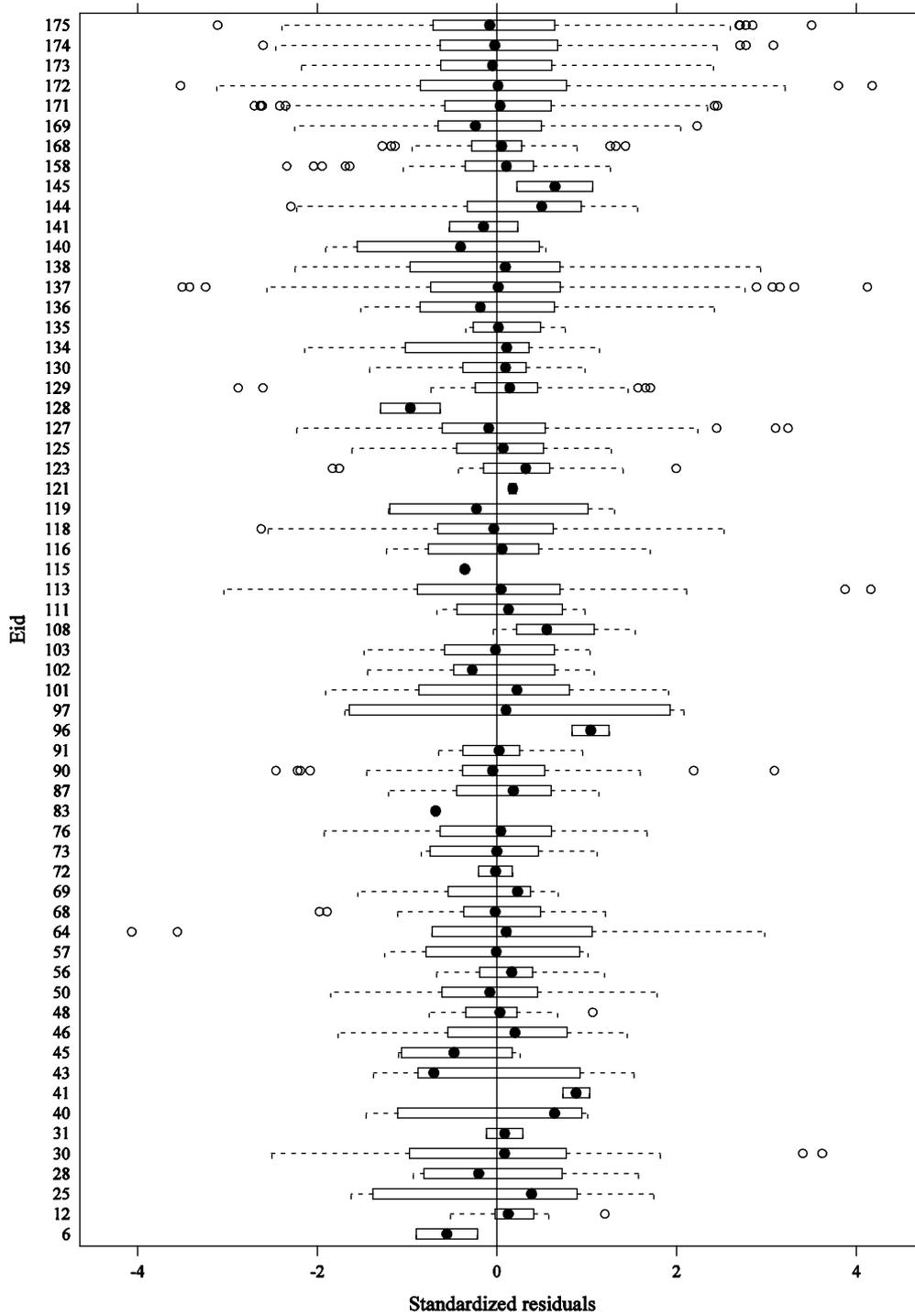


Figura 7: distribuzione dei residui standardizzati in funzione del terremoto

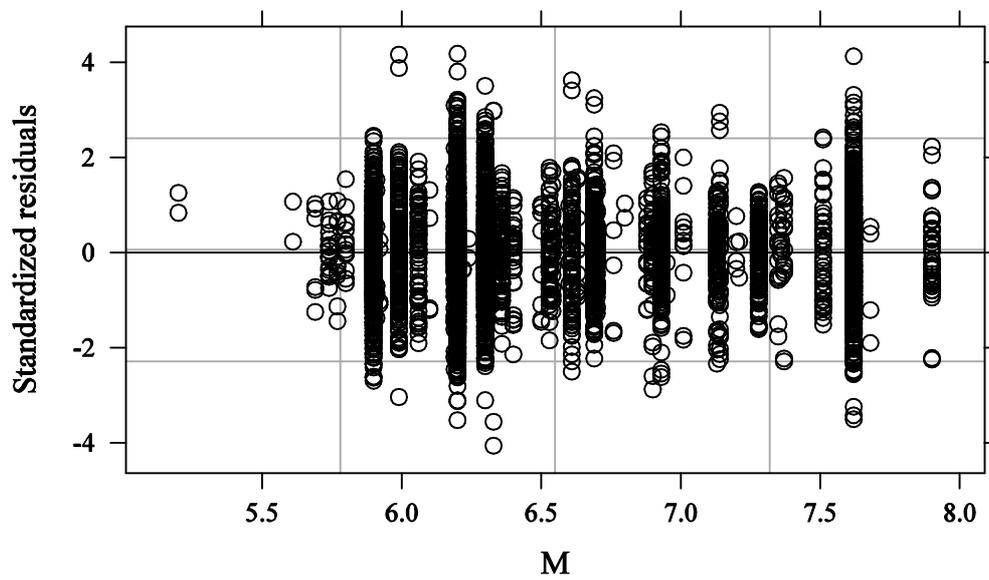


Figura 8: residui standardizzati in funzione della magnitudo

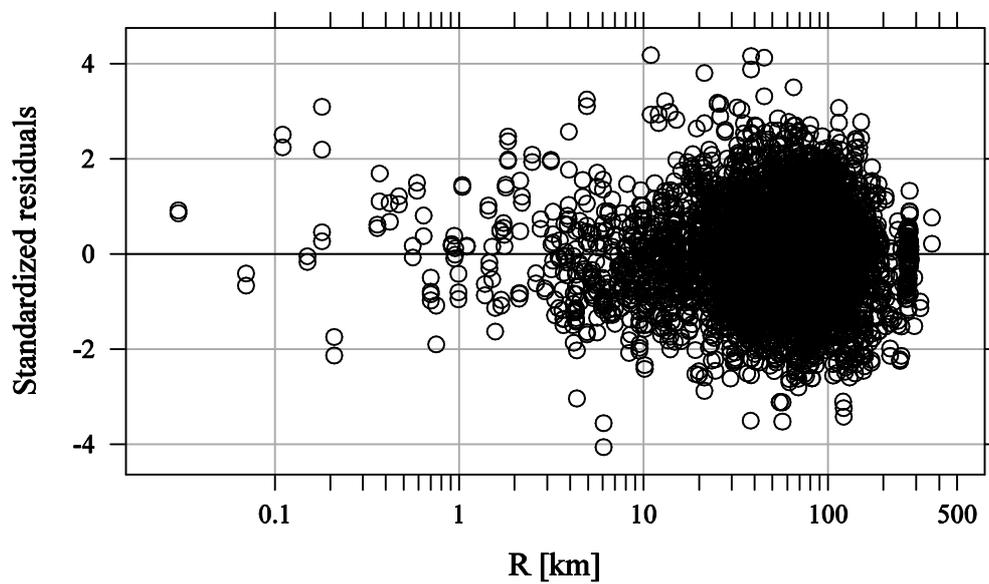


Figura 9: residui standardizzati in funzione della distanza (in scala logaritmica)

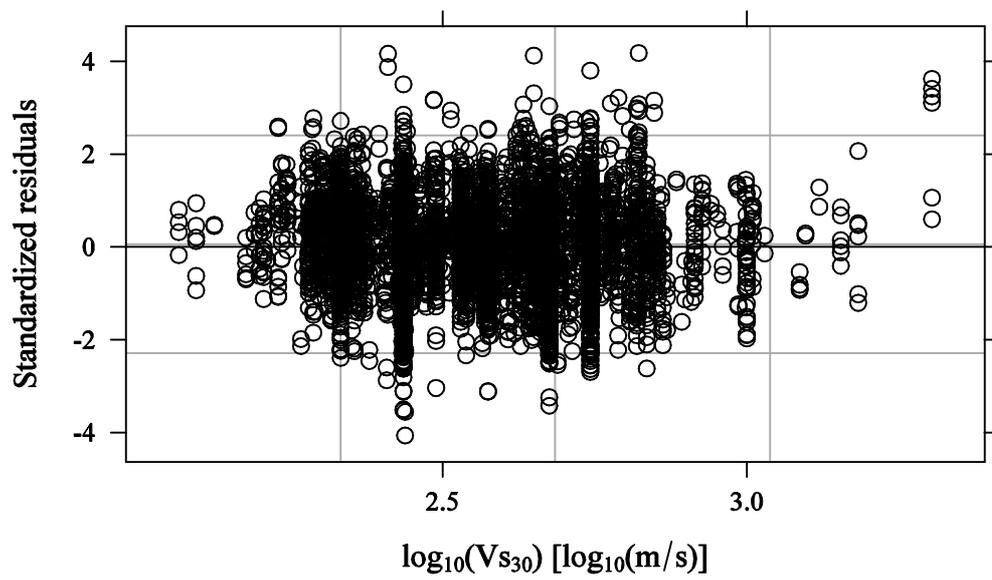


Figura 10: residui standardizzati in funzione del tipo di terreno

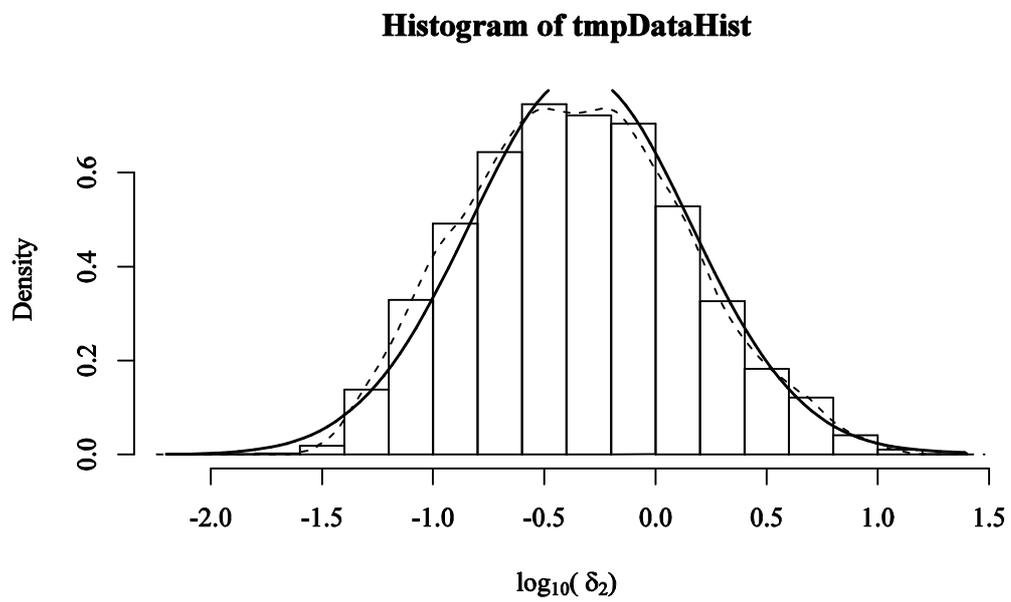


Figura 11: distribuzione del log(PGA) rispetto alla Gaussiana

Histogram of residuals(modelData, type = "p")

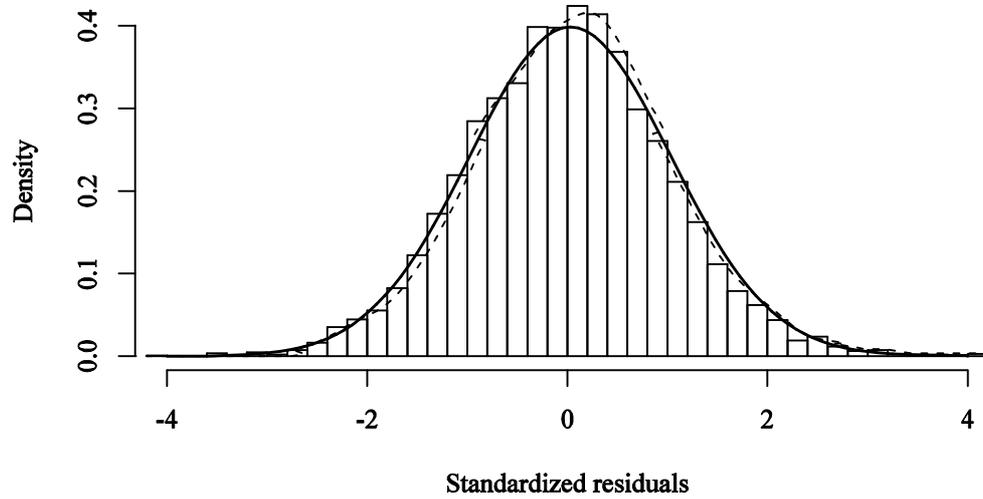


Figura 12: distribuzione dei logaritmi dei residuali rispetto alla Gaussiana

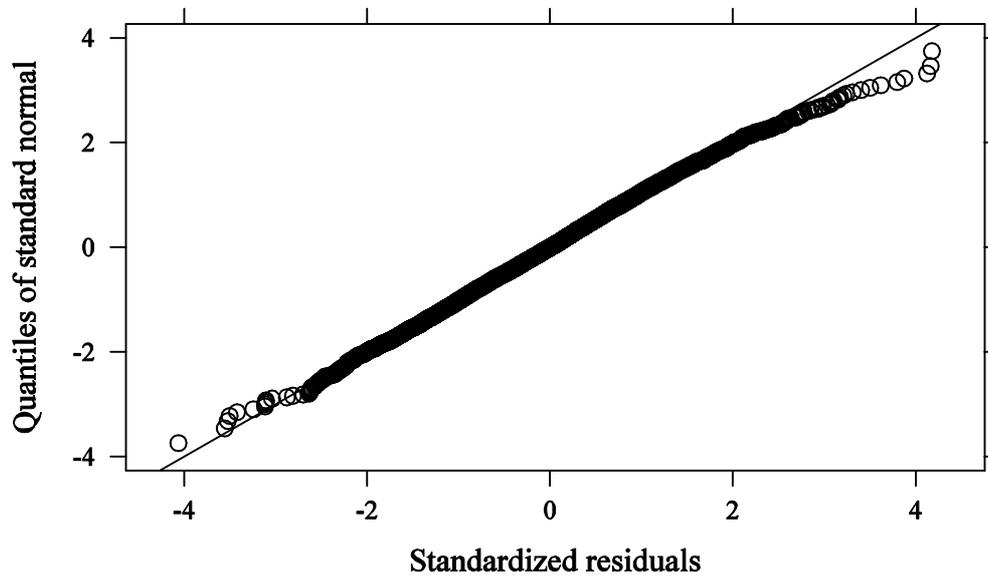


Figura 13: quantili dei residuali

La figura 12 mostra la distribuzione dei residui dei dati espressi in forma logaritmica, associati ad un determinato periodo proprio di vibrazione della struttura, rispetto alla Gaussiana: ci si aspetta che i residui standardizzati si dispongano secondo un andamento lognormale, distribuzione che viene ipotizzata in fase di regressione.

La figura 13 è un'ulteriore rappresentazione di quanto illustrato nell'immagine precedente ed è stata ottenuta seguendo questa procedura implementata in Matlab: i 5523 residui calcolati tramite la regressione sono stati salvati in ordine crescente in un vettore. Una volta individuato il valore massimo e quello minimo, il range di residui è stato suddiviso in 100 intervalli equispaziati.

residuale _{max}	-1.3379
residuale _{min}	-5.53079
$\Delta_{\text{residuale}}$	0.041929

Prendendo in considerazione il generico intervallino i (di estremi $\text{residuale}_{\min} + (i-1) \cdot \Delta_{\text{residuale}}$ e $\text{residuale}_{\min} + i \cdot \Delta_{\text{residuale}}$) sono stati contati gli elementi del vettore dei residui il cui valore rispettasse la condizione:

$$\text{residuale} \leq \text{residuale}_{\min} + i \cdot \Delta_{\text{residuale}}$$

E' stato ripetuto lo stesso procedimento per tutti gli intervalli e infine è stato rappresentato il numero di elementi (diviso per 5523) in funzione dell'estremo dell'intervallo con il quale sono confrontati. Il grafico così ottenuto è chiamato curva di frequenza cumulata.

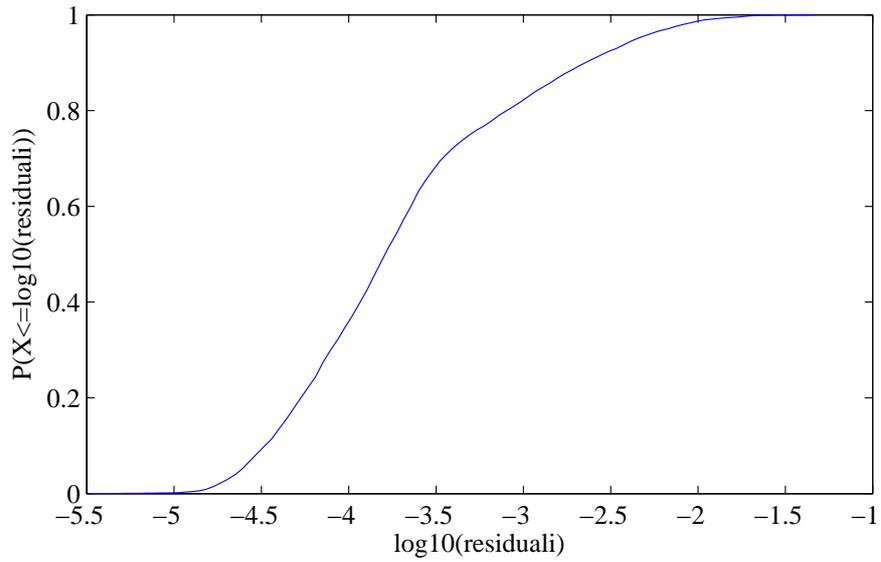


Figura 14: curva di frequenza cumulata

Utilizzando una funzione di Matlab in grado di calcolare l'inversa della funzione di frequenza cumulata, è stata valutata la curva cumulata normalizzata, cioè con media 0 e deviazione standard pari a 1, associata alle frequenze di superamento individuate in precedenza. In altre parole, fissati i valori sull'asse delle ordinate sono stati valutati quelli delle ascisse in modo da ottenere una distribuzione standard.

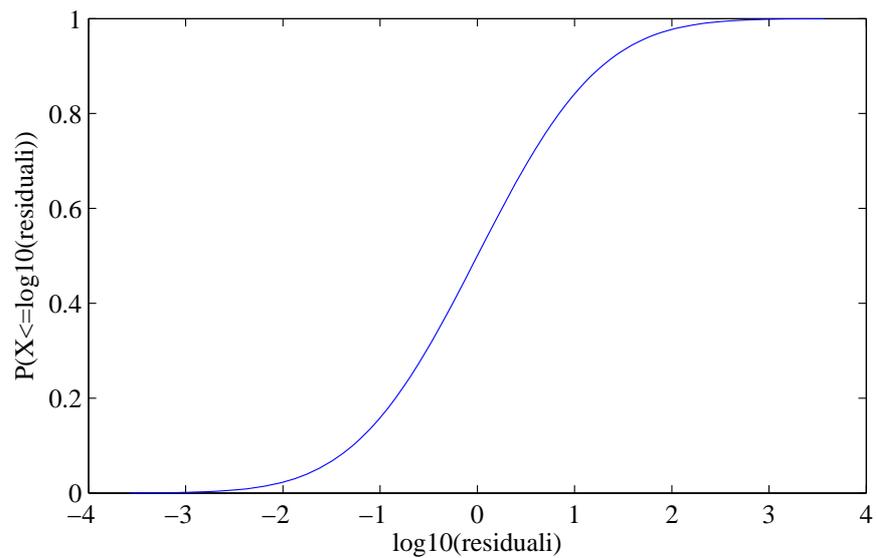


Figura 15: curva di frequenza cumulata standard

Rappresentando in un unico grafico i valori dei residuali provenienti dalle due distribuzioni e associati alle stesse frequenze di superamento si è ottenuto il grafico mostrato nella figura 13: esso mostra come la distribuzione del logaritmo dei residuali sia ben approssimabile attraverso una Gaussiana.

CRISIS assume che i dati relativi ad una data ordinata spettrale, una volta stabilita una certa magnitudo e distanza, siano distribuiti secondo una lognormale intorno al valore fornito dalla legge di attenuazione. Questa distribuzione è stata troncata inserendo un parametro, detto AMAX, che indica l'intervallo di pseudoaccelerazioni da considerare nel successivo processo di integrazione della PSHA. Il troncamento avviene ad una distanza dal valore centrale pari a AMAX volte la deviazione standard, dove AMAX è stato calcolato a partire dal massimo tra i valori assoluti dei residuali nel modo indicato:

$$AMAX = -(\max|\text{residuali}| + 0.1)$$

Questo valore deve essere negativo per esigenze del programma, infatti se questo fosse inserito positivo il troncamento verrebbe effettuato tra 0 e AMAX e non tra $-|AMAX|$ e $+|AMAX|$ come nel caso studiato. Si è aggiunta anche la quantità 0.1 per allargare l'intervallo considerato nell'analisi.

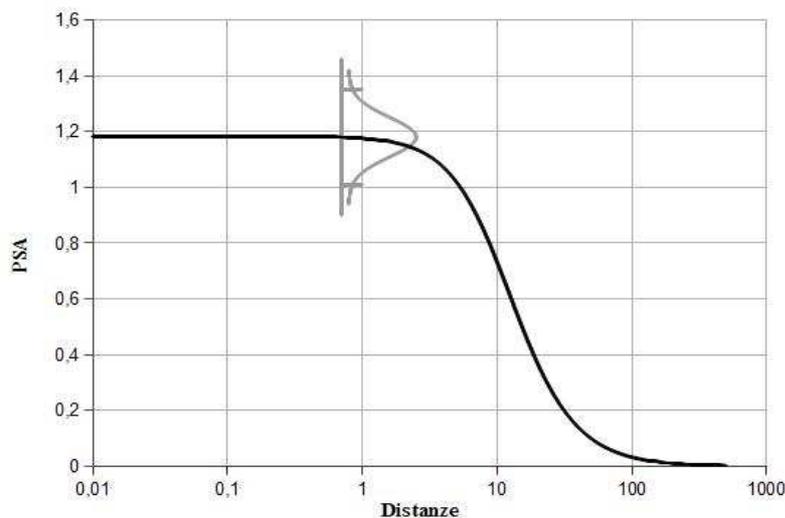


Figura 16: rappresentazione della dispersione statistica delle pseudoaccelerazioni e del troncamento operato sulla distribuzione

3. confronto con altre relazioni di attenuazione proposte

In letteratura si trovano numerose relazioni di attenuazione, ricavate a partire da database accelerometrici diversi. I modelli elaborati da Abrahamson e Silva (2008), Boore e Atkinson (2008), Campbell e Bozorgnia (2008), Chiou e Youngs (2008) e Idriss (2008) fanno riferimento all'NGA Database e per questo motivo sono ritenuti idonei per essere confrontati con la relazione di attenuazione proposta in questa tesi.

Come mostrato dal grafico sottostante, la relazione ottenuta dalla procedura illustrata nel presente capitolo risulta confrontabile con quelle appena elencate. La maggiore irregolarità rilevabile è dovuta al fatto che non sono state utilizzate tecniche di smoothing.

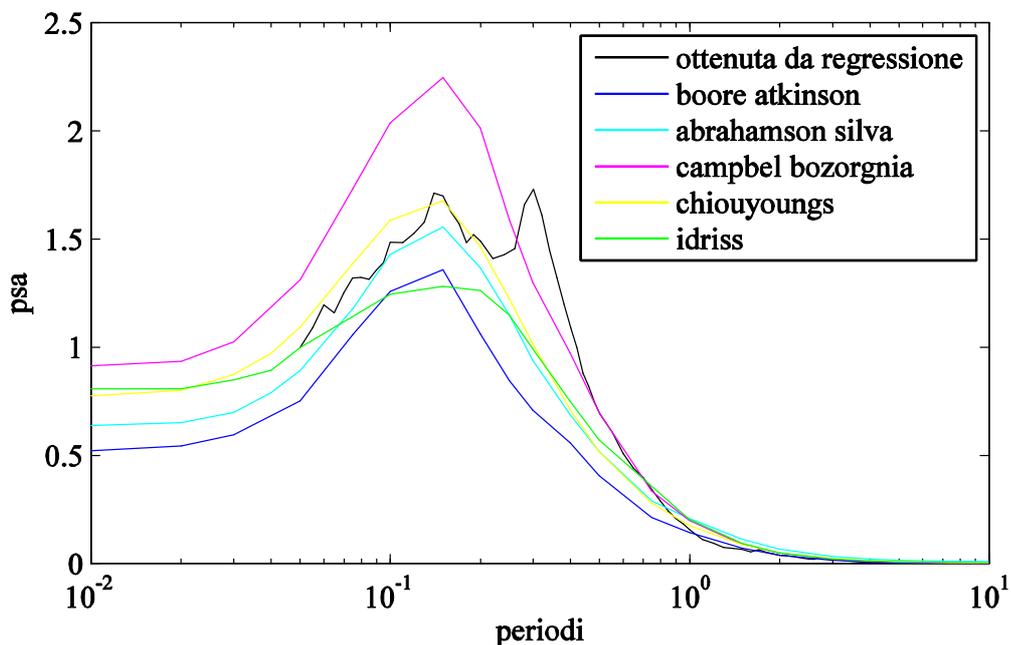


Figura 17: confronto tra diverse relazioni di attenuazione (per $M=5$, $R_{JB}=10\text{km}$, $V_{s,30}=1000$)

4. Relazioni di attenuazione per l'oscillatore elastoplastico

Per quanto riguarda le relazioni di attenuazione per l'analisi delle strutture con comportamento non lineare, queste sono state ottenute tramite un processo di regressione analogo a quello descritto per il caso elastico.

Le time histories sono state applicate alla base degli oscillatori elastoplastici inelastici che differiscono tra loro per il periodo fondamentale di vibrazione e per la forza di snervamento. Quest'ultima è legata alla massima forza agente nel caso di comportamento elastico lineare tramite la relazione:

$$F_y = \frac{F_{el}}{q}$$

dove la forza elastica è stata calcolata come prodotto tra la pseudoaccelerazione corrispondente ad un certo periodo T e la massa, assunta unitaria, dell'oscillatore:

$$F_y = \frac{psa(T) \cdot m}{q}$$

T	0.1	0.3	0.5	1	2
q	1	2	3	4	5

Figura 18: periodi e fattori di struttura

Poiché la massa e il periodo fondamentale sono stati fissati, gli oscillatori sono caratterizzati da una rigidezza k ottenuta come segue:

$$k = 4\pi^2 \cdot \frac{m}{T^2}$$

Per ogni struttura, associata ad una coppia di periodo proprio e fattore q, sono stati calcolati gli spostamenti massimi in sommità indotti dalle 5523 registrazioni presenti nel catalogo. I dati così ottenuti sono stati utilizzati per

ricavare le costanti c delle relazioni di attenuazione, espresse in questo caso nella forma:

$$\log_{10} X_{\max}(T) = c_1 + c_2 \cdot M + c_3 \cdot (M - 6)^2 + (c_4 + c_5 \cdot M) \cdot \log_{10} \left(\sqrt{R^2 + c_6^2} \right) + c_7 \cdot \log_{10}(V_{S,30})$$

Per ogni T analizzato, la regressione è stata eseguita 5 volte, una per ogni fattore di struttura considerato. Per ognuna di queste sono stati ricavati tanti vettori di costanti c quanti sono i periodi considerati.

La relazione ottenuta per $q=1$ è stata confrontata con quella ricavata per gli oscillatori elastici, poiché per un coefficiente di struttura unitario la forza di snervamento dell'oscillatore elastoplastico coincide con la forza elastica a cui è soggetto l'oscillatore lineare e per questo motivo ci si aspetta che le escursioni in campo plastico del primo siano limitate.

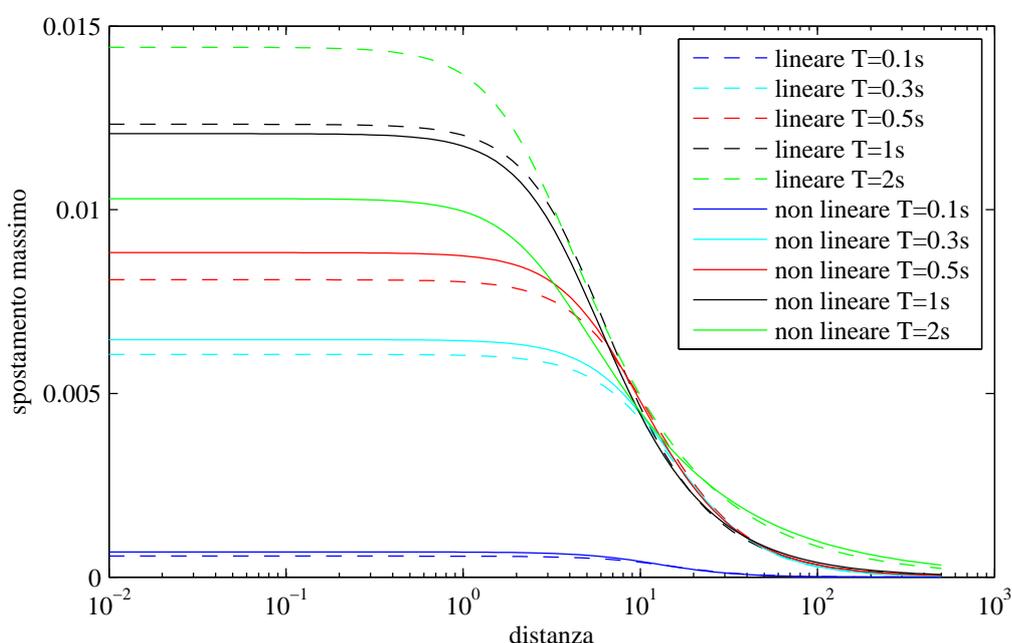


Figura 19: relazioni di attenuazione in termini di spostamento ($M=5$)

La figura 18 conferma quanto appena esposto, infatti le relazioni di attenuazione elastiche e elastoplastiche, entrambe espresse in termini di spostamento massimo, hanno andamenti molto simili ad eccezione del caso degli oscillatori caratterizzati da $T=2$ s.

Si ritiene che tale discrepanza tra gli spostamenti predetti dalle due relazioni sia dovuta al fatto che quasi la metà delle registrazioni applicate alla struttura elastoplastica abbia indotto su di essa deformazioni permanenti e per questo motivo un confronto tra il comportamento di questo oscillatore e quello elastico lineare non risulta significativo.

A sostegno di questa tesi si riportano, per ogni periodo fondamentale, il numero di registrazioni in grado di produrre sulla struttura deformazioni oltre il limite elastico, lo spostamento associato alla forza di snervamento, il valore medio e la deviazione standard degli spostamenti ottenuti dall'applicazione delle time histories agli oscillatori.

T=0.1 s	T=0.3 s	T=0.5 s	T=1 s	T=2 s
360	402	941	1886	2399

Tabella 13: numero di registrazioni per le quali $\delta > \delta_{\text{snervamento}}$ ($q=1$)

	T=0.1 s	T=0.3 s	T=0.5 s	T=1 s	T=2 s
$\delta_{\text{snervamento}}$	0.0012	0.0126	0.0166	0.0219	0.0299
media($\delta_{q=1}$)	0.0004286	0.0045616	0.0110003	0.0265871	0.0497530
$\sigma(\delta_{q=1})$	0.0011705	0.0075141	0.0184399	0.0428105	0.0813828

Tabella 14: parametri che caratterizzano la distribuzione degli spostamenti elastici ed elastoplastici per $q=1$

Si osserva che per $T=2$ s lo spostamento medio è ben oltre quello di snervamento e che in questo caso i dati risultano molto più dispersi intorno al loro valore medio rispetto a quanto accade per periodi più brevi.

Vale la pena osservare che l'ipotesi di uguali spostamenti tra strutture elastiche e elastoplastiche, generalmente ritenuta accettabile, risulta poco rappresentativa del reale comportamento delle strutture, in particolare per quelle con periodi di vibrazione lunghi.

Come per il caso elastico, sono stati eseguiti alcuni test per verificare se il legame funzionale adottato fosse effettivamente in grado di rappresentare l'andamento dei dati reali.

Una particolare attenzione è stata dedicata ai grafici che riportano i quantili dei residuali. Si è osservato che la distribuzione dei residuali standardizzati degli spostamenti presi con il loro valore logaritmico non segue l'andamento della Gaussiana a differenza di ciò che si era riscontrato nel caso dell'oscillatore elastico. Questa discrepanza è tanto più evidente quanto più è corto il periodo di vibrazione della struttura analizzata, mentre non sembra essere particolarmente influenzata dal coefficiente di struttura utilizzato.

Di seguito sono riportati i grafici dei quantili ottenuti per $q=4$ e i 5 periodi propri studiati:

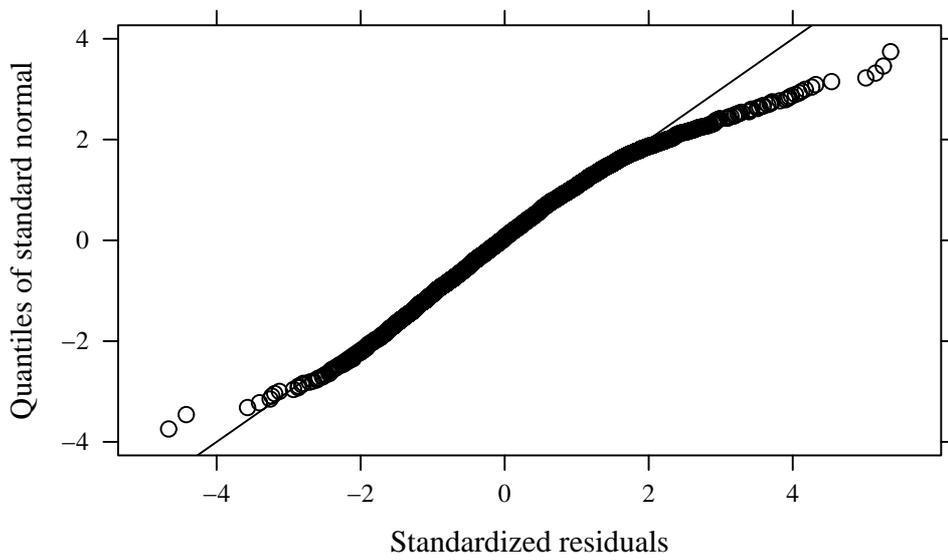


Figura 20: diagramma quantile-quantile dei residuali per $q=4$ e $T=0.1s$

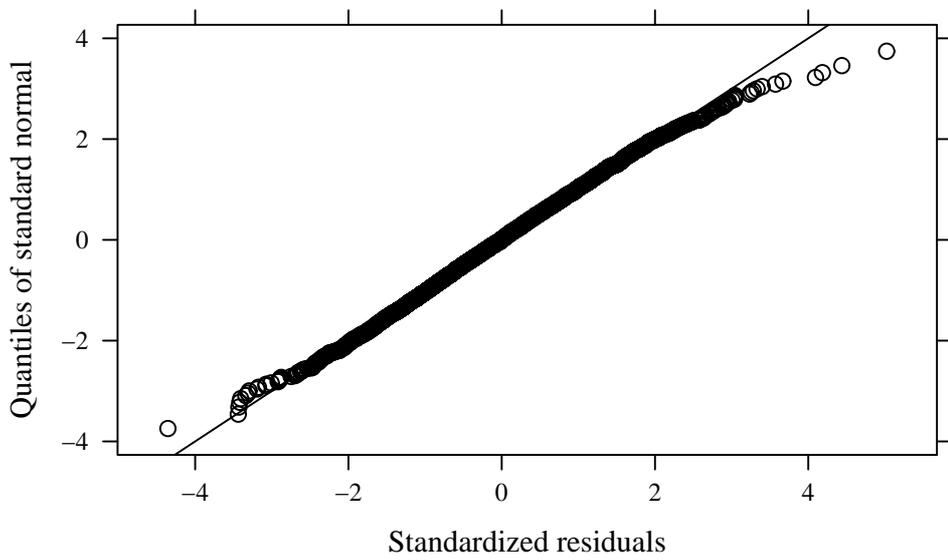


Figura 21: diagramma quantile-quantile dei residuali per $q=4$ e $T=0.3s$

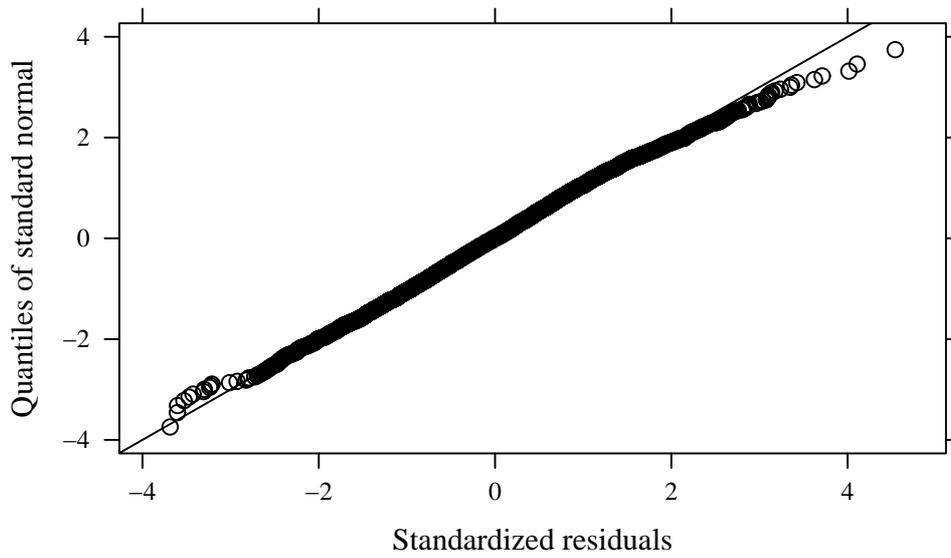


Figura 22: diagramma quantile-quantile dei residui per $q=4$ e $T=0.5s$

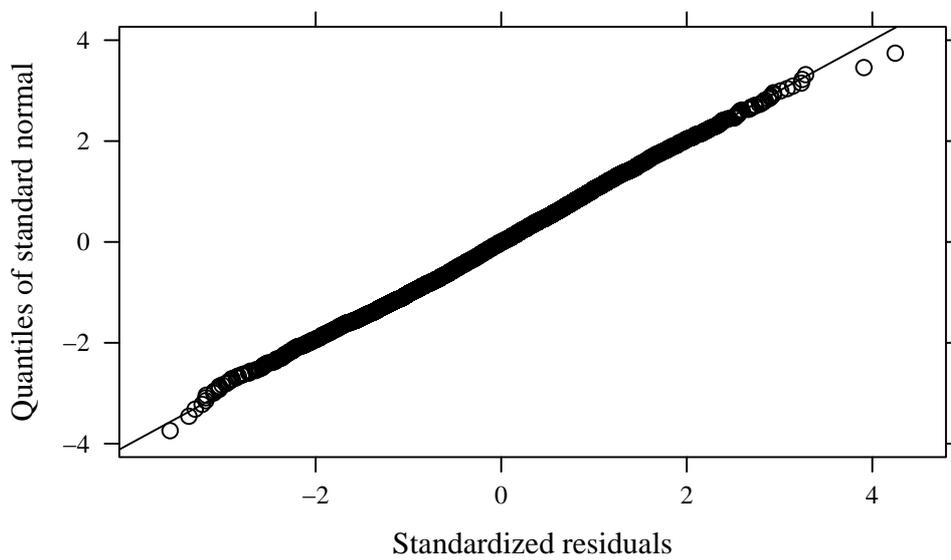


Figura 23: diagramma quantile-quantile dei residui per $q=4$ e $T=1s$

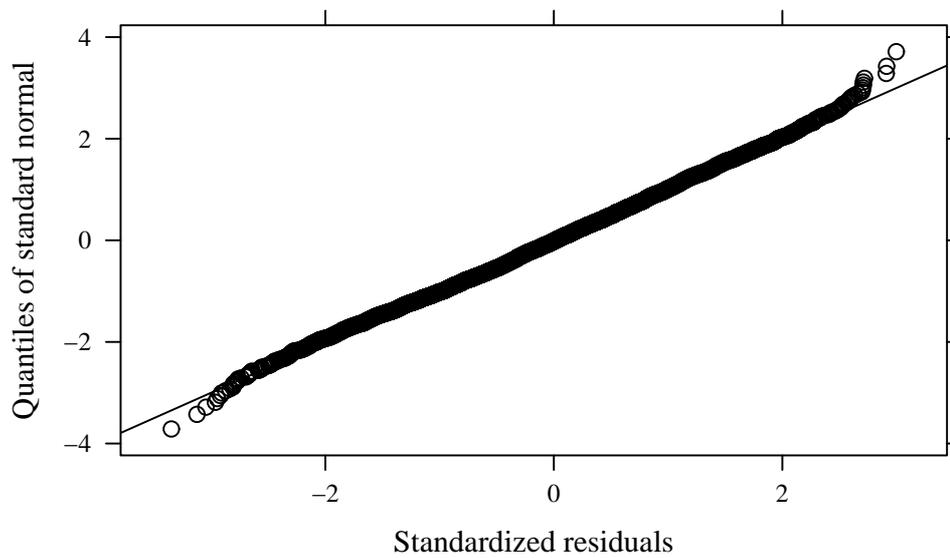


Figura 24: diagramma quantile-quantile dei residuali per $q=4$ e $T=2s$

Questa tendenza anomala osservata nei residuali è stata riscontrata anche nella distribuzione degli spostamenti logaritmici, per questo motivo si è cercata una formulazione alternativa delle relazioni di attenuazione. In particolare si è voluta individuare quella trasformazione che applicata agli spostamenti massimi degli oscillatori permettesse ai dati così rielaborati di distribuirsi meglio secondo una normale, distribuzione ipotizzata durante la regressione.

5. Confronto con le relazioni di attenuazione in termini esponenziali

Per ricavare la seconda formulazione delle relazioni di attenuazione indagata, i valori di spostamento oggetto della regressione sono stati elevati ad un esponente α .

La relazione ha quindi assunto la forma:

$$X_{\max}(T)^\alpha = c_1 + c_2 \cdot M + c_3 \cdot (M - 6)^2 + (c_4 + c_5 \cdot M) \cdot \log_{10}(\sqrt{R^2 + c_6^2}) + c_7 \cdot \log_{10}(V_{S,30})$$

Non potendo stabilire a priori quale fosse l' α in grado di restituire valori di ordinata spettrale distribuiti secondo la normale, sono stati considerati gli esponenti riportati nella tabella 16 appartenenti all'intervallo $-0.2 \div -0.01$.

Esponenti (α)	-0.01	-0.02	-0.03	-0.04	-0.05	-0.06	-0.07	-0.08	
-0.09	-0.1	-0.105	-0.11	-0.115	-0.12	-0.121	-0.122	-0.123	-0.124
-0.125	-0.126	-0.127	-0.128	-0.129	-0.13	-0.135	-0.14	-0.145	-0.15
-0.155	-0.16	-0.165	-0.17	-0.175	-0.18	-0.185	-0.19	-0.195	-0.2

Tabella 15: esponenti considerati

Considerando un α alla volta, gli spostamenti espressi in forma esponenziale sono stati utilizzati per costruire un grafico dei quantili: questo, come già esposto in precedenza, permette di confrontare la distribuzione dei dati con la Gaussiana. E' stato inoltre calcolato il parametro R^2 che, variando tra 0 e 1, fornisce una misura della distanza fra le due distribuzioni. Un valore di R^2 prossimo ad 1 indica che la distribuzione normale è in grado di cogliere in modo accurato l'andamento dei dati mentre per $R^2=0$ tale distribuzione non risulta adeguata.

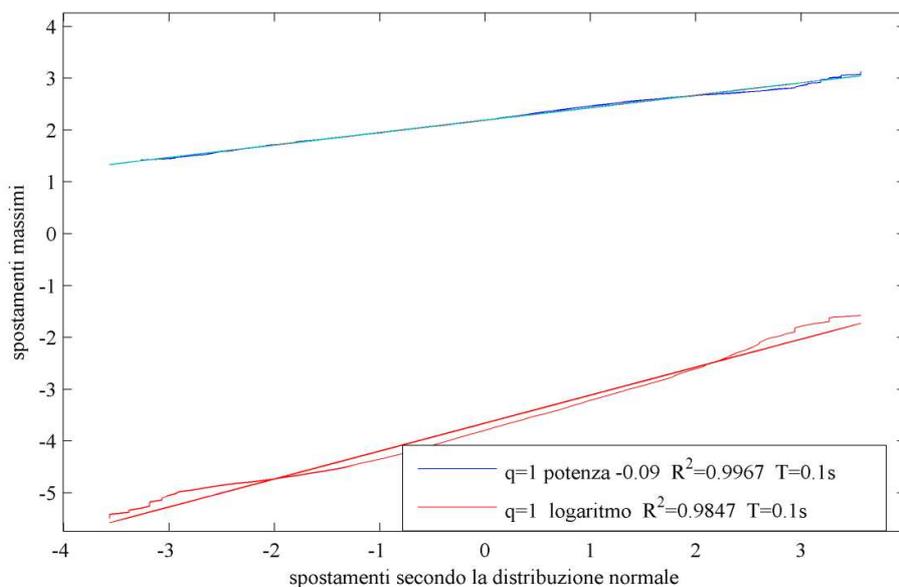


Figura 25: grafico dei quantili per il logaritmo e l'esponenziale degli spostamenti

Facendo variare l'esponente è stato quindi possibile individuare l' α ottimale, cioè quello al quale è associato un coefficiente di determinazione R^2 più vicino all'unità.

Nel grafico sottostante è stato riportato R^2 in funzione di α per l'oscillatore elastoplastico caratterizzato da $T=0.1s$ e $q=1$.

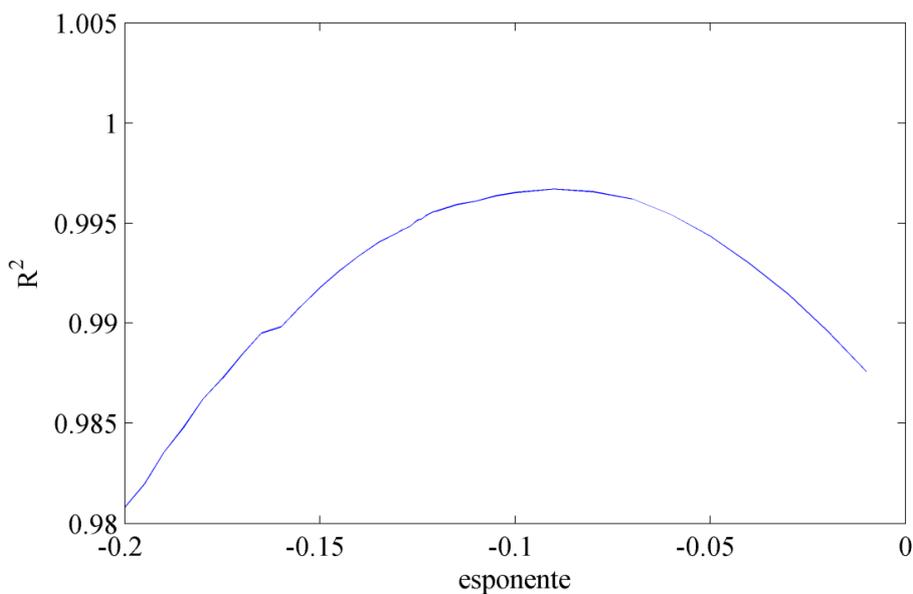


Figura 26: R^2 in funzione dell'esponente di X_{max} ($T=0.1s$, $q=1$)

Lo stesso procedimento è stato ripetuto per ogni oscillatore e gli esponenti ottenuti sono quelli elencati:

	T=0.1 s	T=0.3 s	T=0.5 s	T=1 s	T=2 s
q=1	-0.09	-0.04	-0.08	-0.02	-0.03
q=2	-0.1	-0.06	-0.08	-0.02	-0.05
q=3	-0.127	-0.07	-0.105	-0.03	-0.05
q=4	-0.12	-0.07	-0.1	-0.03	-0.04
q=5	-0.122	-0.07	-0.08	-0.03	-0.05

Tabella 16: esponenti adottati per ogni oscillatore

	T=0.1 s	T=0.3 s	T=0.5 s	T=1 s	T=2 s
q=1	0.9967	0.998	0.9975	0.9982	0.9978
q=2	0.9935	0.9971	0.9962	0.9973	0.9973
q=3	0.9908	0.9966	0.9957	0.9978	0.9965
q=4	0.9895	0.9958	0.9957	0.9978	0.9963
q=5	0.988	0.9953	0.9955	0.9978	0.9963

Tabella 17: R² per (spostamenti)^a

	T=0.1 s	T=0.3 s	T=0.5 s	T=1 s	T=2 s
q=1	0.9847	0.9961	0.9925	0.9977	0.9965
q=2	0.9787	0.9935	0.9897	0.9968	0.9955
q=3	0.9751	0.9921	0.9885	0.9967	0.9951
q=4	0.9743	0.9907	0.9883	0.9969	0.9951
q=5	0.9745	0.99	0.9882	0.9968	0.995

Tabella 18: R² per log(spostamenti)

I coefficienti di determinazione sono stati successivamente confrontati con quelli ottenuti per gli spostamenti in forma logaritmica: la variazione di R² è stata valutata come segue:

$$\text{variazione} = \frac{R_{\text{exp}}^2 - R_{\text{log}}^2}{R_{\text{log}}^2}$$

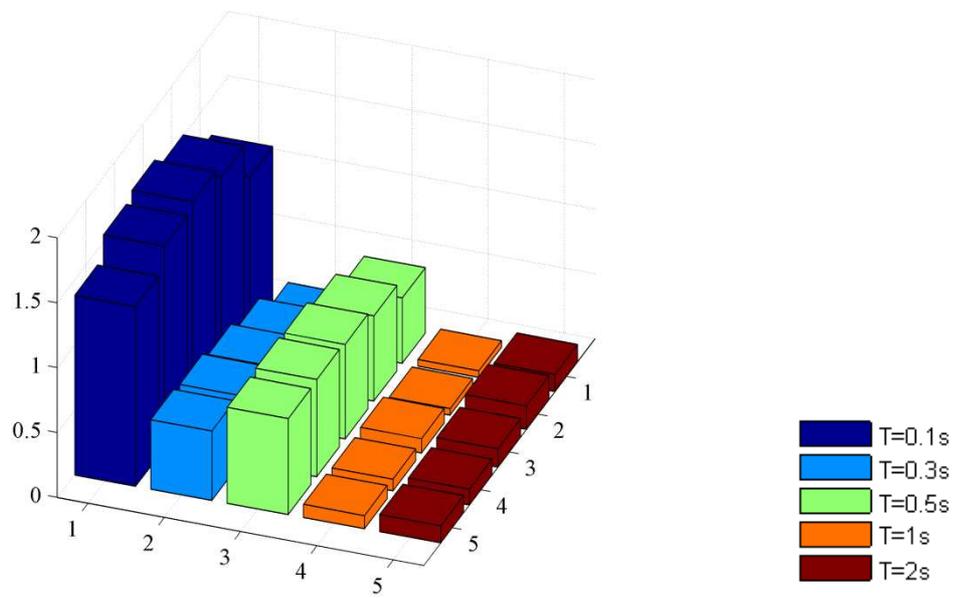


Figura 27:

Come è evidenziato dal grafico, considerare gli esponenziali degli spostamenti risulta particolarmente vantaggioso per i periodi corti.

Questa formulazione tuttavia non può essere utilizzata per il calcolo della pericolosità sismica perché il programma utilizzato non è in grado di elaborare i dati forniti in scale diverse da quella logaritmica.

4. Risultati dell'analisi di pericolosità sismica

In generale, il tasso di superamento di una certa ordinata spettrale ottenuto dall'i-esima zona sismogenetica è calcolato a partire dalla seguente espressione:

$$v_i(a) = \sum_j w_{ij} \int_{M_0}^{M_u} \left(-\frac{d\lambda_i(M)}{dM} \right) \Pr(A > a | M, R_{ij}) dM$$

dove M_0 e M_u sono, rispettivamente, la magnitudo minima e massima considerata nell'analisi, $\Pr(A > a | M, R_{ij})$ è la probabilità che l'ordinata spettrale superi il valore a nel sito, a causa di un sisma di magnitudo M originato nella zona sorgente considerata ad una distanza dal luogo esaminato pari a R_{ij} . La zona viene suddivisa in più aree e ad ognuna di queste è associato un peso w_{ij} . Si assume $\sum w_{ij} = 1$. Infine i contributi alla pericolosità sismica di tutte le N zone vengono sommati:

$$v(a) = \sum_{i=1}^N v_i(a)$$

CRISIS fornisce per ogni periodo considerato i tassi di superamento associati ad svariati valori dell'ordinata spettrale e questi dati sono utilizzati per costruire lo spettro di risposta isoprobabile.

Si consideri il seguente esempio:

l'ordinata spettrale esaminata è la psa corrispondente ad un periodo fondamentale di vibrazione di 0.05s. Ai fini della progettazione si cerca il valore dell'ordinata spettrale con un periodo di ritorno di 475 anni, alla quale

corrisponde cioè una probabilità di superamento del 10% in 50 anni. Il tasso di superamento annuo associato si calcola quindi come $1/475$ e risulta 0.0021 sismi/anno. Le psa variano tra 0.01m/s^2 e 6 m/s^2 e come si può vedere il tasso di superamento cercato è compreso tra il quarto e il terzo valore dal fondo.

psa (0.05s)	tasso di superamento
0.0010000	2.436380
0.0013498	2.435270
0.0018221	2.431490
0.0024595	2.420700
0.0033199	2.394760
0.0044813	2.341730
0.0060490	2.248720
0.0081652	2.107430
0.0110217	1.919450
0.0148775	1.697580
0.0200822	1.461490
0.0271076	1.230150
0.0365909	1.016040
0.0493917	0.824310
0.0666707	0.655849
0.0899945	0.510638
0.1214780	0.388812
0.1639750	0.289885
0.2213400	0.211993
0.2987720	0.152057
0.4032940	0.106569
0.5443810	0.072474
0.7348250	0.047245
0.9918930	0.029126
1.3388900	0.016734
1.8072900	0.008816
2.4395400	0.004175
3.2929800	0.001745
4.4449800	0.000629
6.0000000	0.000186

Tabella 19: psa(0.05s) e tassi di superamento

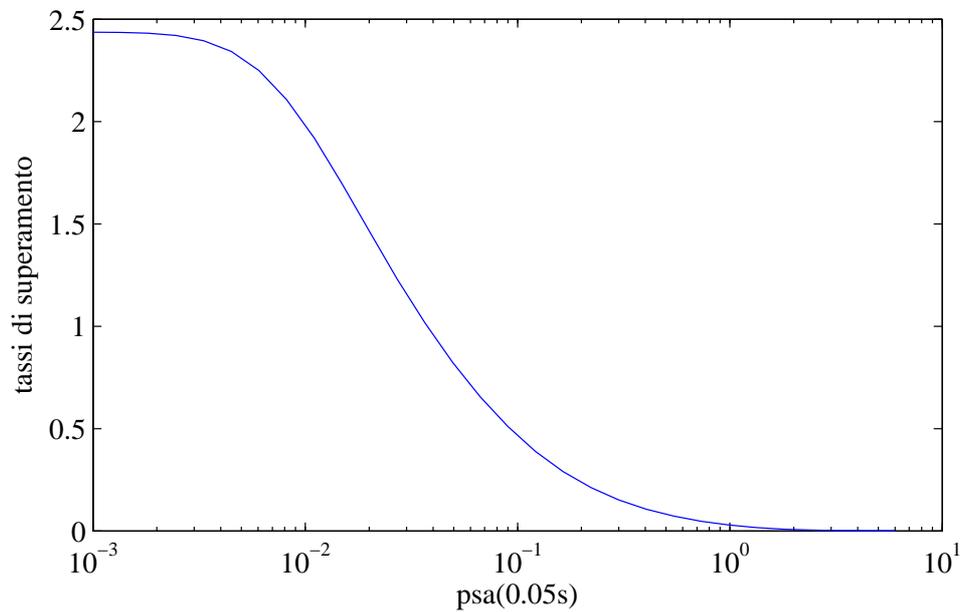


Figura 28: tassi di superamento in funzione di psa(0.05s)

La pseudoaccelerazione viene determinata tramite un'interpolazione lineare.

$$\frac{\text{psa}(0.05\text{s}) - 3.29298}{2.43954 - 3.29298} = \frac{0.0021 - 0.001745}{0.004175 - 0.001745}$$

Ripetendo lo stesso ragionamento per tutti i 75 periodi considerati si ottiene lo spettro associato ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni.

Analogamente, scegliendo come ordinata spettrale lo spostamento massimo si ricavano gli spettri isoprobabili in termini di spostamento.

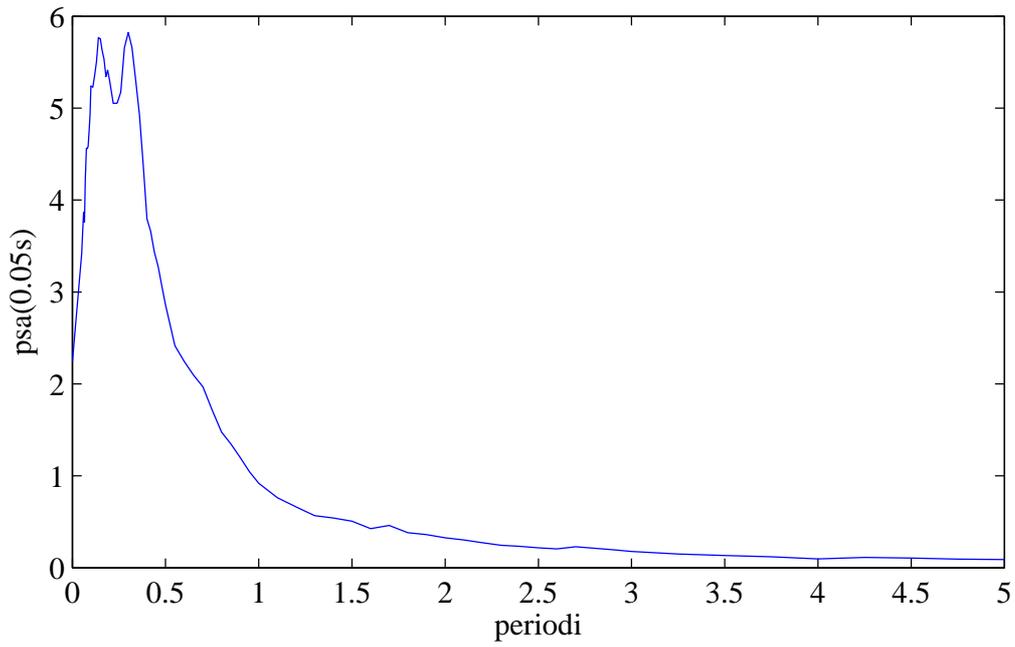


Figura 29: spettro elastico per un periodo di ritorno di 475 anni

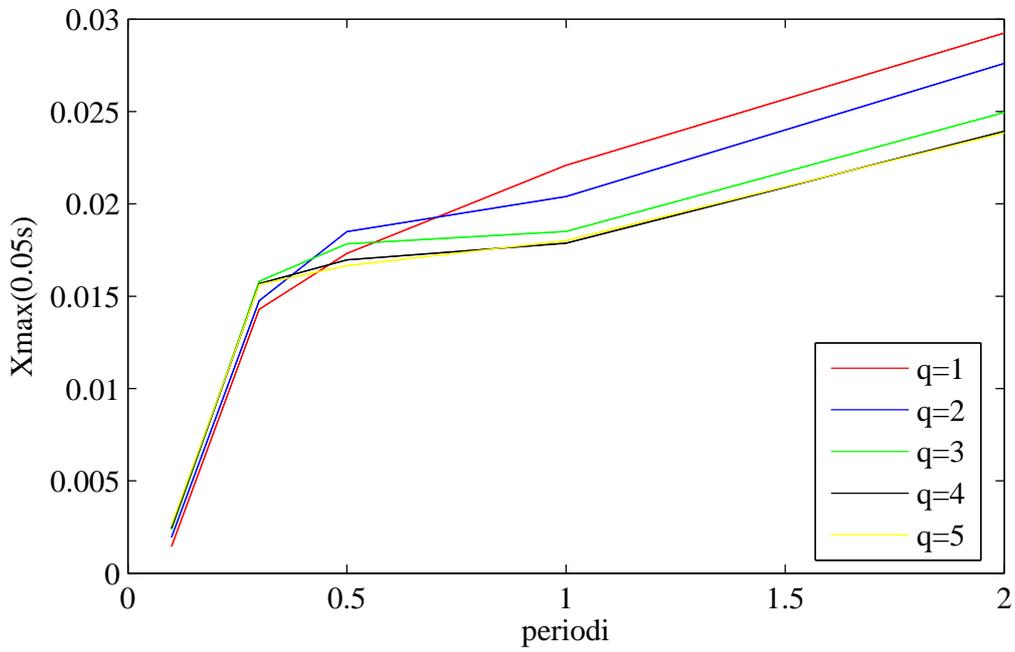


Figura 30: spettro in termini di spostamento per un periodo di ritorno di 475 anni

CRISIS è in grado di calcolare anche la disaggregazione del rischio sismico in termini di magnitudo e distanza, un'operazione che consente di valutare il contributo di ogni combinazione di zona sismogenetica e intensità del terremoto alla pericolosità di un sito. Il processo di disaggregazione permette quindi di individuare l'evento sismico (o gli eventi sismici) che contribuisce maggiormente alla pericolosità sismica del luogo in esame.

La disaggregazione è fornita sottoforma di tabelle, una per ogni ordinata spettrale e tasso di superamento. Per un periodo di ritorno di 475 anni sono stati ottenuti i risultati graficati:

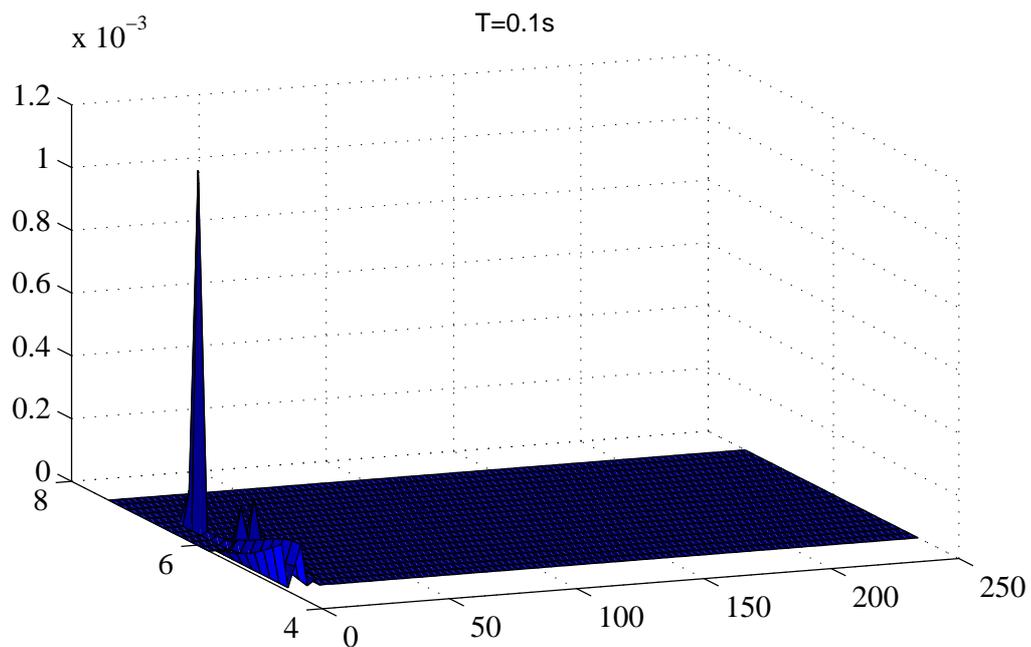


Figura 31: disaggregazione per $T=0.1s$, Distanze da 0 a 250km, magnitudo da 4.65 a 7.41

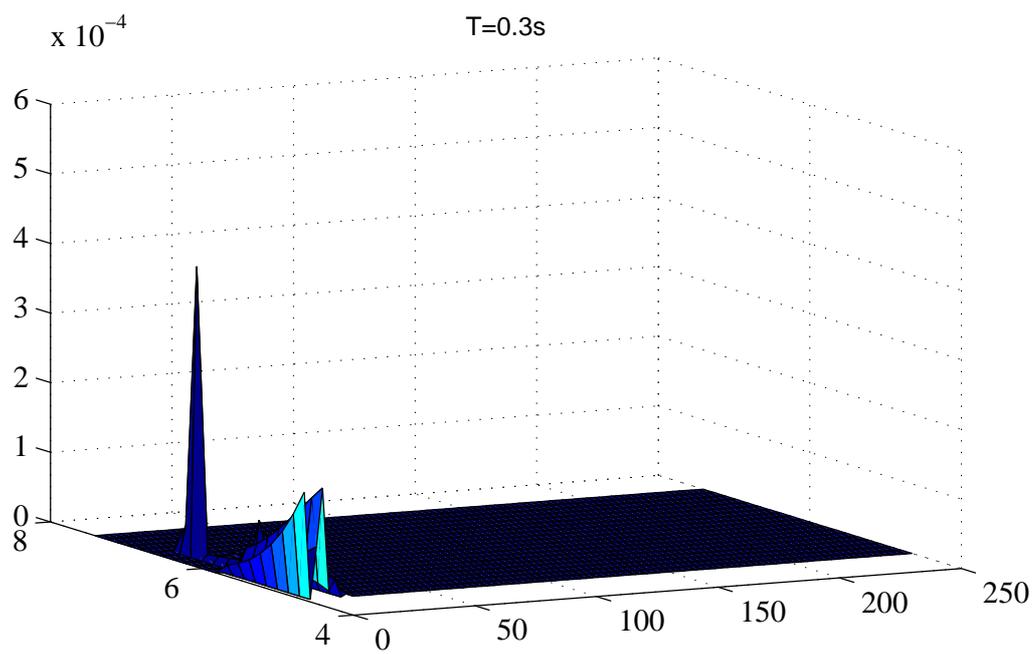


Figura 32: disaggregazione per T=0.3s, Distanze da 0 a 250km, magnitudo da 4.65 a 7.41

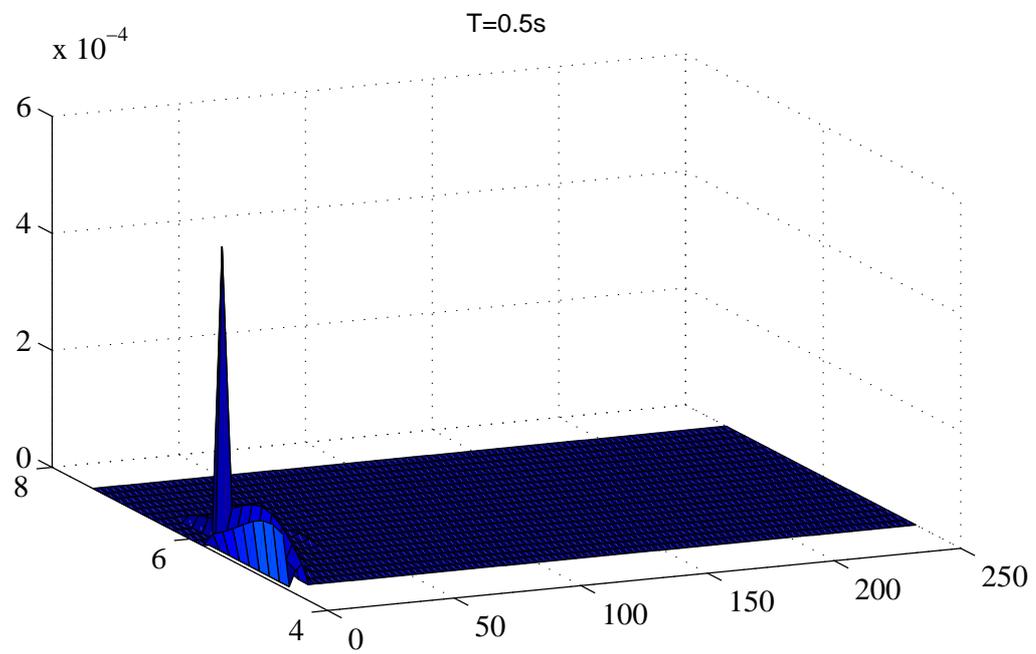


Figura 33: disaggregazione per T=0.5s, Distanze da 0 a 250km, magnitudo da 4.65 a 7.41

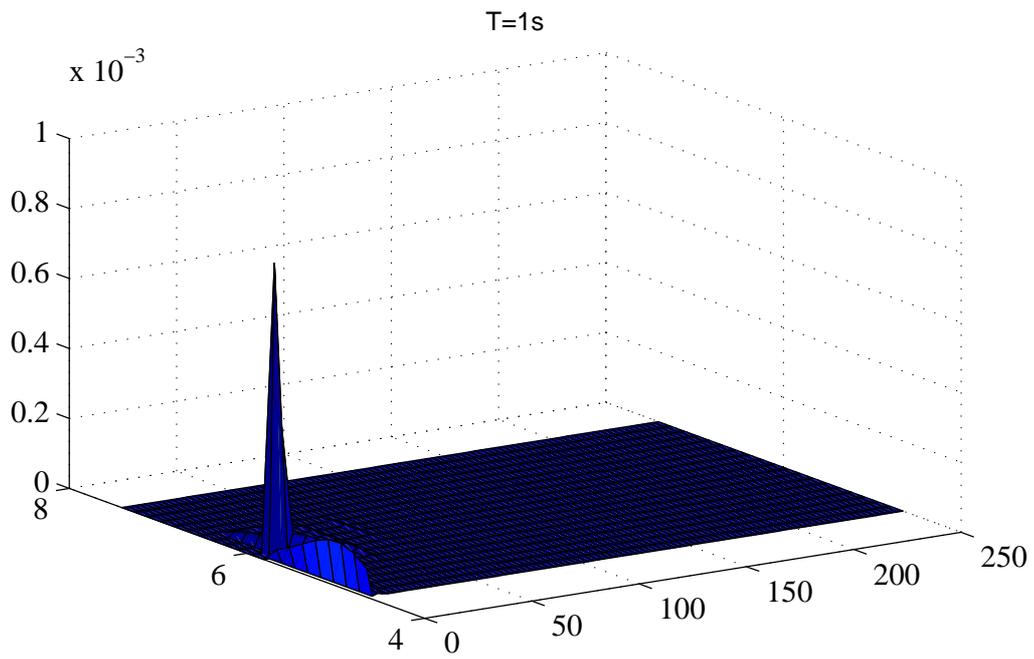


Figura 34: disaggregazione per T=1s, Distanze da 0 a 250km, magnitudo da 4.65 a 7.41

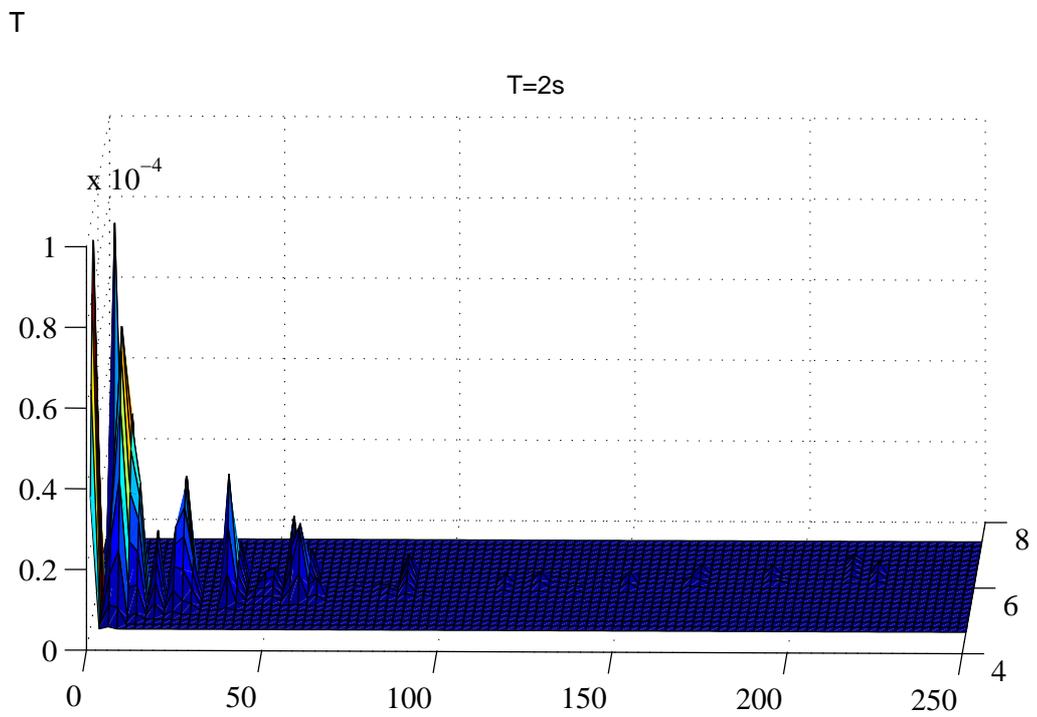


Figura 35: disaggregazione per T=2s, Distanze da 0 a 250km, magnitudo da 4.65 a 7.41

Per T=2 si nota che non esiste un unico scenario sismico rilevante ai fini della pericolosità sismica, ma che, a differenza di quanto accade per i periodi più corti, ci sono moltissime combinazioni di magnitudo e distanza che la influenzano (nella tabella sono riportate le due coppie M/R più significative).

	magnitudo	distanza
T=0.1 s	6.393	10.101
T=0.3 s	6.393	10.101
T=0.5 s	5.812	7.576
T=1 s	5.812	5.051
T=2 s	5.086	0
	5.812	5.51

Tabella 20: scenari sismici ottenuti dalla disaggregazione;

5. Criteri di scelta

Come già accennato in precedenza, i gruppi di 7 registrazioni da usare nelle analisi dinamiche non lineari vengono selezionati in base alla compatibilità del loro spettro medio rispetto allo spettro elastico isoprobabile. Gli accelerogrammi scelti per formare i gruppi provengono da un ampio database accelerometrico. In generale si può pensare di operare una preselezione delle registrazioni riportate nel database al fine di ottenere gruppi composti da time histories associate, ad esempio, ad uno stesso intervallo di magnitudo oppure ad uno stesso intervallo di distanze sito-sorgente.

In questo capitolo vengono presi in considerazione alcuni possibili criteri di preselezione: si vuole valutare come l'applicazione di ognuno di questi al catalogo influenzi la formazione dei gruppi spettrocompatibili e in particolare si vuole verificare se esistano o meno criteri di scelta che permettano l'individuazione di quegli accelerogrammi in grado di generare sul modello una risposta strutturale confrontabile con quella attesa.

1. procedura per l'individuazione dei gruppi di accelerogrammi

La procedura implementata per individuare i gruppi in base alla loro compatibilità è questa:

per prima cosa è stato calcolato lo spettro (in termini di pseudoaccelerazione e periodo) di ogni registrazione presa in esame e questo è stato confrontato con lo spettro isoprobabile, assunto come riferimento.

Il parametro usato per quantificare lo scostamento tra i due spettri è stato scelto tra due proposti: la distanza assoluta e la distanza relativa, valutate come segue:

$$\delta_{\text{ass}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N [\text{psa}(T_i) - \text{psa}_{\text{rif}}(T_i)]^2}}{N}$$

$$\delta_{\text{rel}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\text{psa}(T_i) - \text{psa}_{\text{rif}}(T_i)}{\text{psa}_{\text{rif}}(T_i)} \right]^2}}{N}$$

Una volta fissato il tipo di distanza da utilizzare per l'analisi, si individuano le 25 registrazioni che singolarmente si avvicinano di più allo spettro di riferimento in corrispondenza di un intervallo di periodi che comprende quello di interesse progettuale.

Combinando gli accelerogrammi selezionati sono stati formati tutti i possibili gruppi e di questi sono stati salvati i primi 100. Successivamente si è preso in esame il primo gruppo, cioè quello il cui spettro medio è più vicino a quello isoprobabile.

Ognuno di questi accelerogrammi è stato applicato ai 5 oscillatori non lineari caratterizzati dallo stesso periodo fissato in precedenza ma da diverse forze di snervamento.

Per ogni fattore q , e quindi per ogni oscillatore analizzato, sono stati calcolati gli spostamenti massimi indotti sulla struttura, trasformati secondo la relazione:

$$\Delta_{ij} = \frac{\delta_{ij} - \delta_{ij,\text{rif}}}{\delta_{ij,\text{rif}}}$$

dove δ_{ij} è lo spostamento associato al i-esimo periodo e j-esimo fattore di struttura mentre $\delta_{ij,rif}$ è lo spostamento riferito alla stessa coppia di T e q con un periodo di ritorno di 475 anni, cioè quello ottenuto dall'analisi di pericolosità sismica. Infine è stata valutata la media dei 7 spostamenti e la loro dispersione intorno a tale valore.

In questo modo è stato valutato quanto il gruppo selezionato fosse in grado di generare sulle strutture i livelli deformativi calcolati attraverso la PSHA.

2. preselezione in termini di magnitudo e distanza sito-sorgente:

Il primo criterio considerato consiste nel sottoporre alla verifica di spettrocompatibilità solo quegli accelerogrammi caratterizzati da una magnitudo compresa in un determinato intervallo. Per questo motivo la procedura descritta in precedenza è stata applicata solo ad una parte del database, ed in particolare a quelle registrazioni per le quali è verificata la condizione: $0 < M_{registrazione} \leq M_{fissata}$.

Facendo variare $M_{fissata}$, cioè il limite superiore del range di magnitudo considerate, si è osservata una variazione delle time histories che risultavano di volta in volta ammissibili.

I grafici riportati rappresentano la media e la deviazione standard degli spostamenti massimi indotti sugli oscillatori dal gruppo di 7 accelerogrammi considerato.

Da questo primo criterio si è osservato che i gruppi che permettono di ottenere con più precisione la risposta strutturale cercata sono individuabili solo prendendo in considerazione ampi intervalli di magnitudo ed in particolare il valore di $M_{fissata}$ non può scendere sotto 6.974. In più

restringendo il campo ad accelerogrammi con magnitudo minori di 6.103 le registrazioni che restano sono meno di 7.

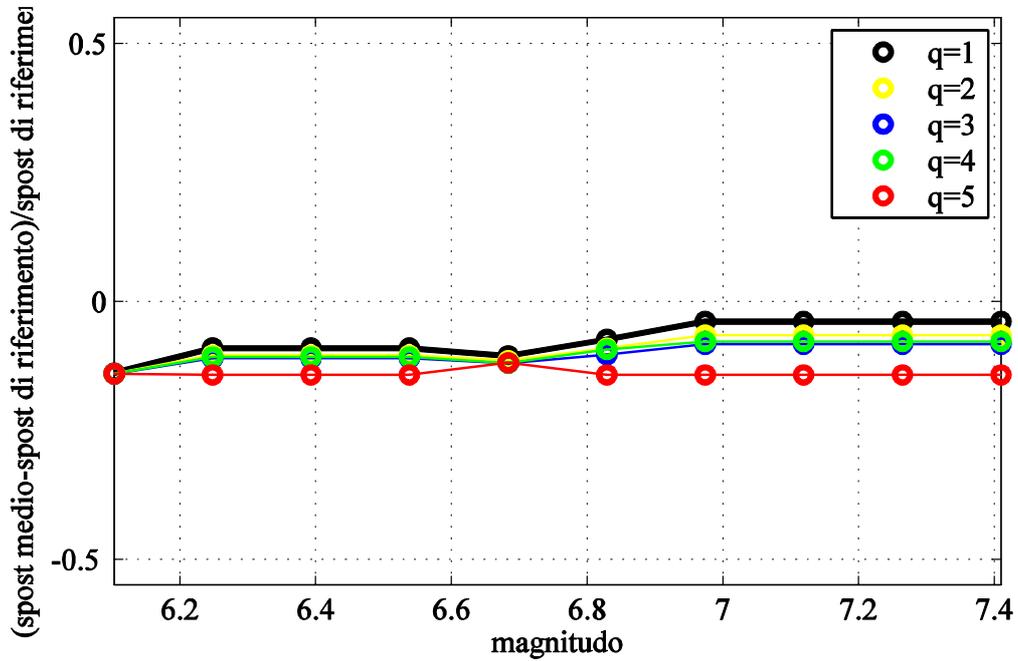


Figura 36: confronto tra Δ ottenuti effettuando diverse preselezioni in termini di magnitudo per $T=0.1s$

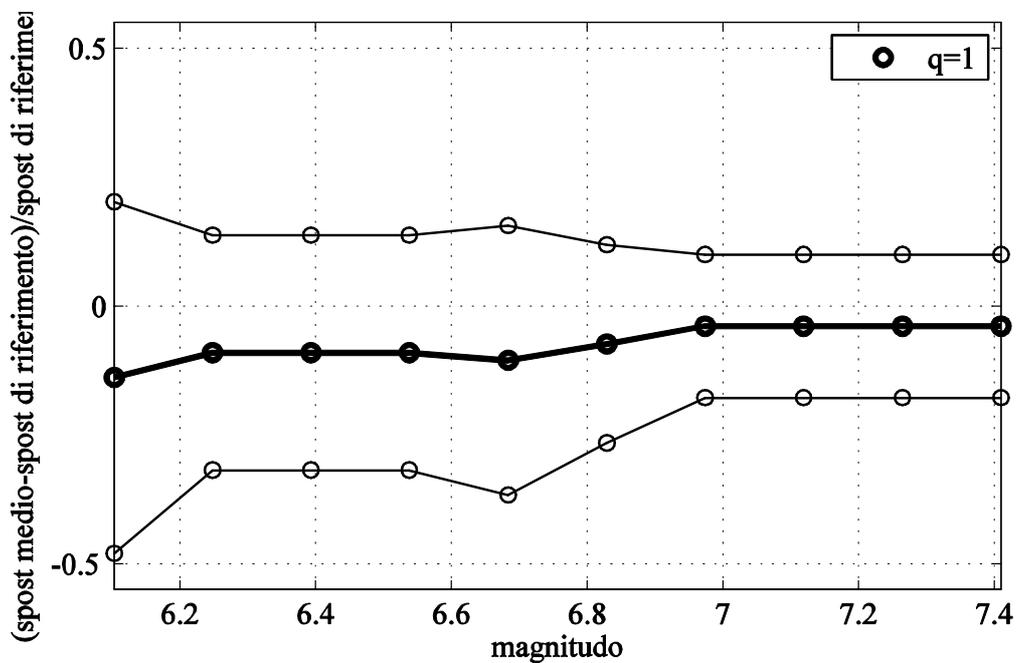


Figura 37: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=1$ e $T=0.1s$)

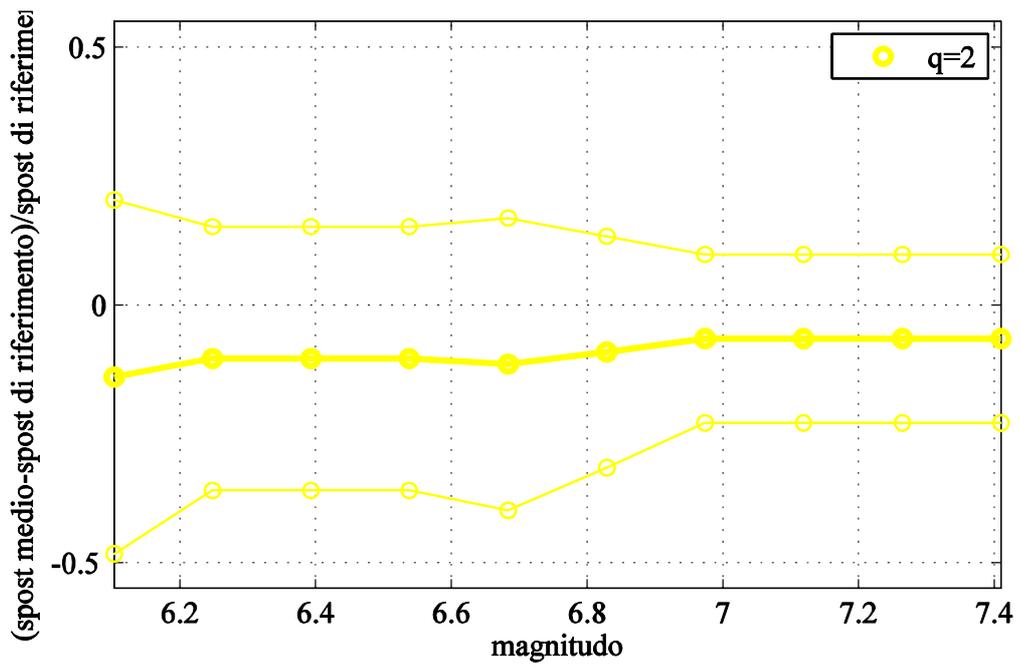


Figura 38: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili (q=2 e T=0.1s)

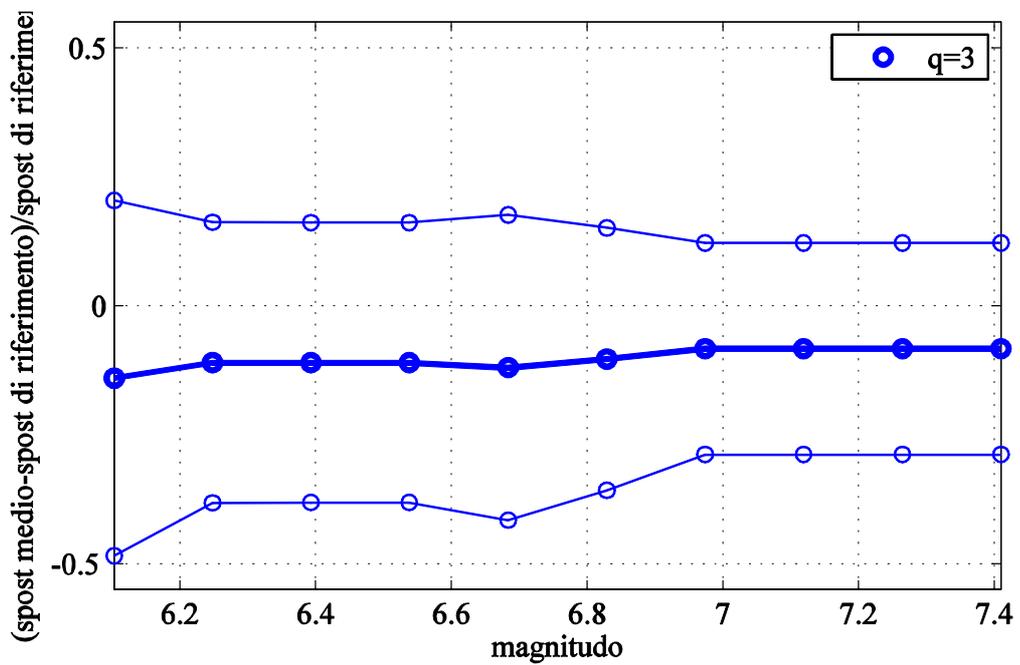


Figura 39: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili (q=3 e T=0.1s)

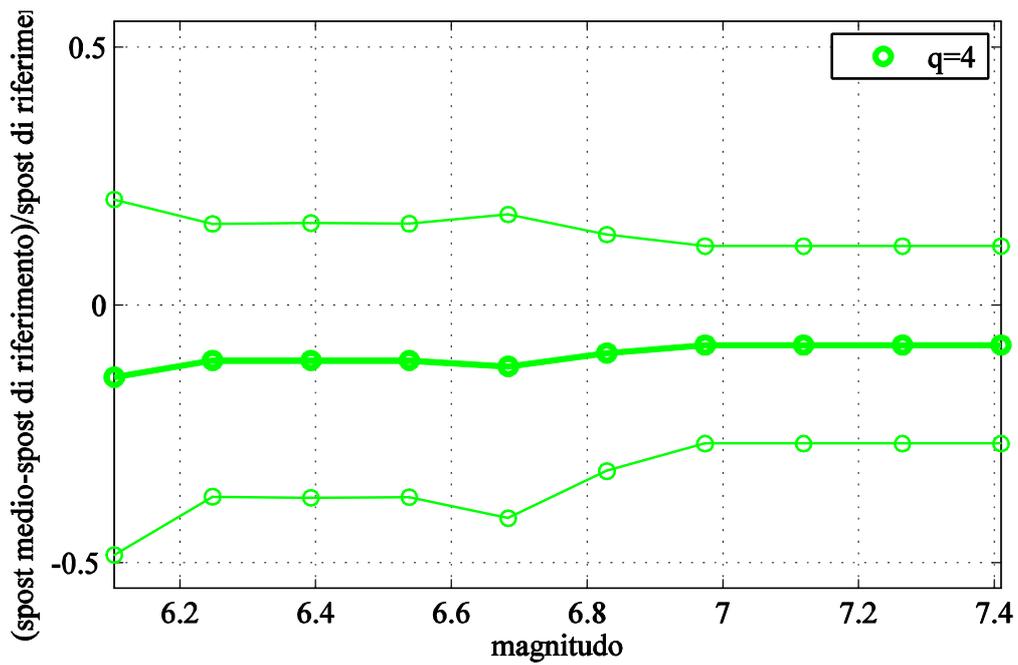


Figura 40: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=4$ e $T=0.1s$)

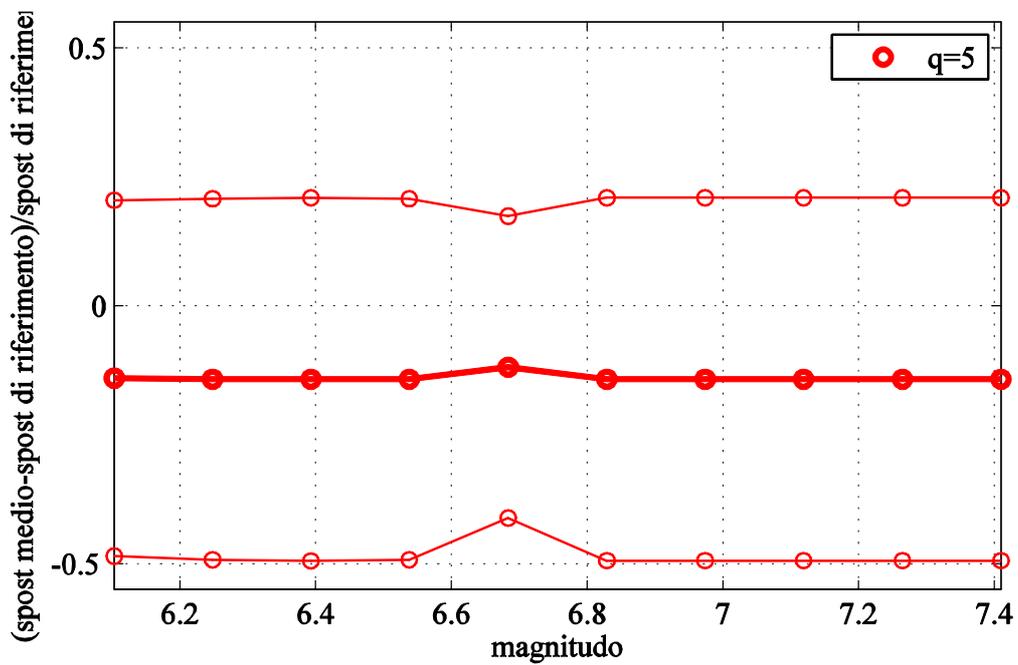


Figura 41: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=5$ e $T=0.1s$)

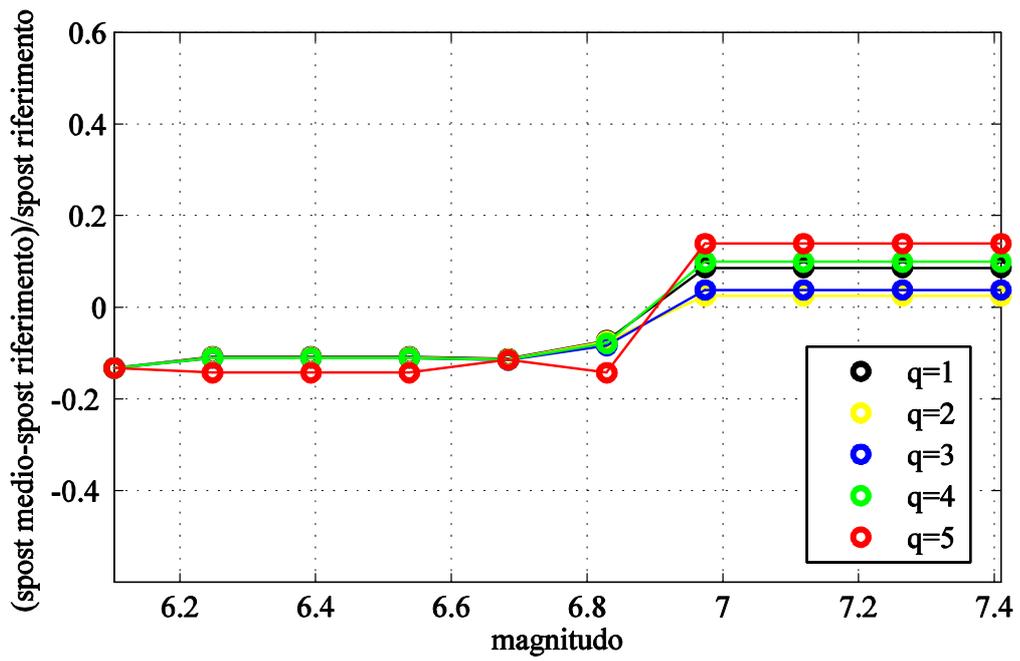


Figura 42: confronto tra Δ ottenuti effettuando diverse preselezioni in termini di magnitudo per $T=0.3s$

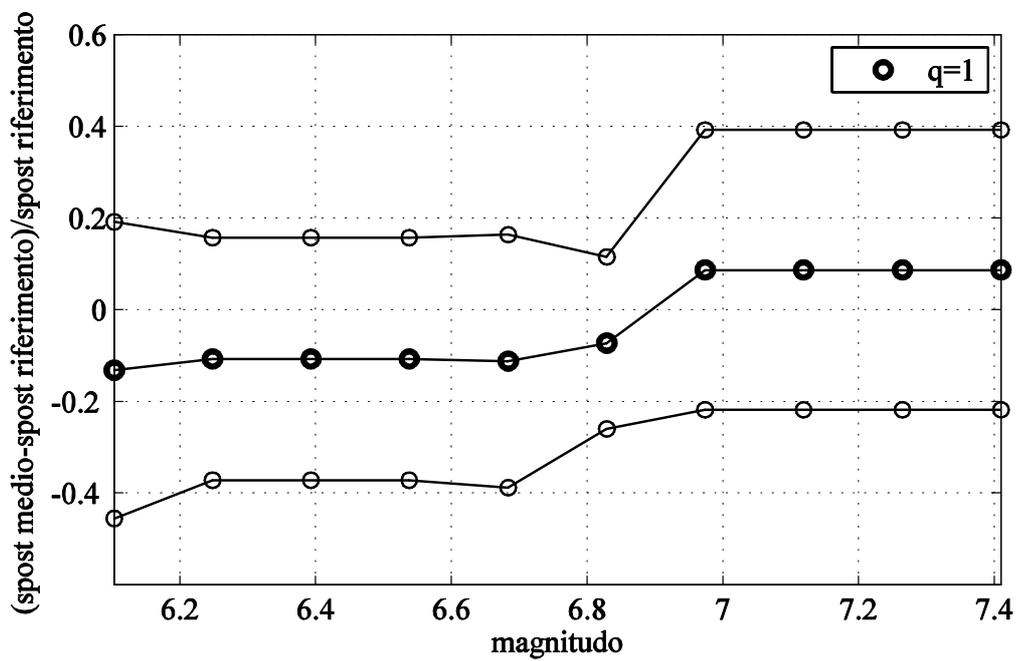


Figura 43: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=1$ e $T=0.3s$)

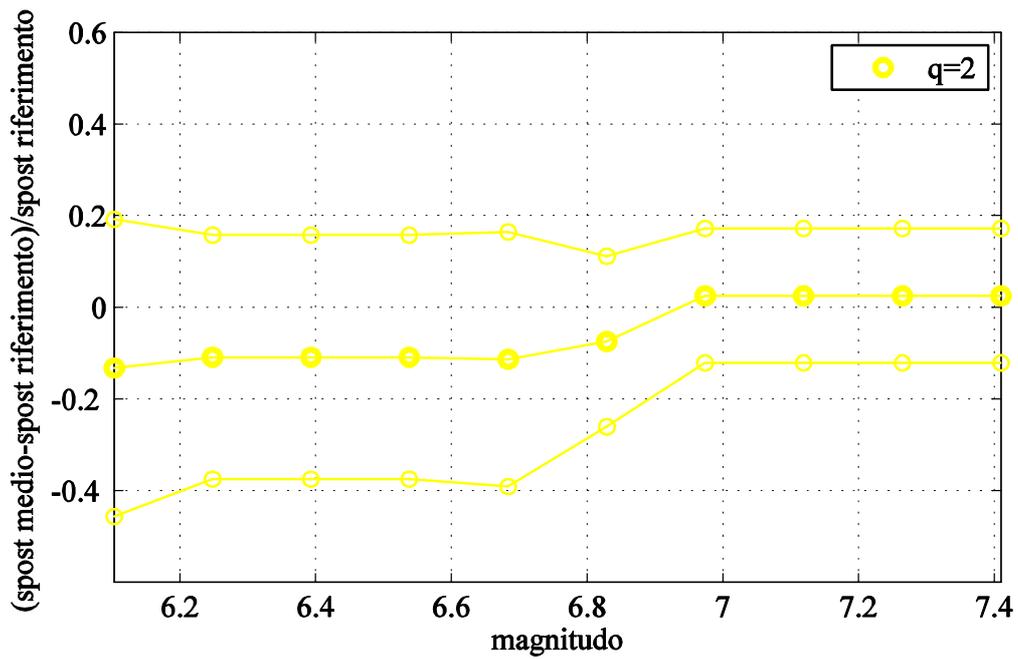


Figura 44: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili (q=2 e T=0.3s)

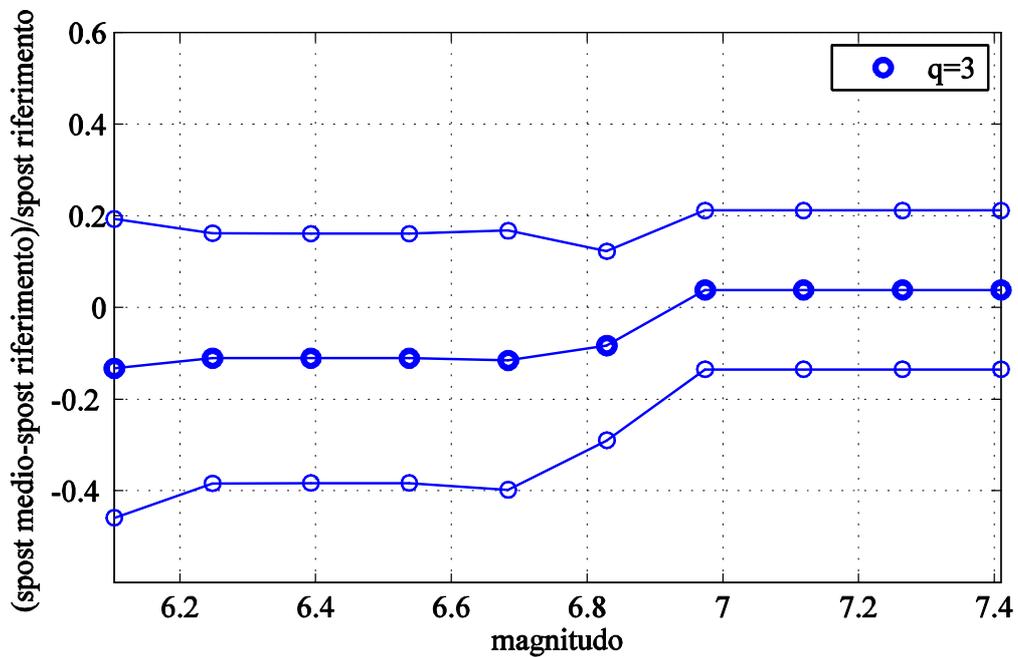


Figura 45: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili (q=3 e T=0.3s)

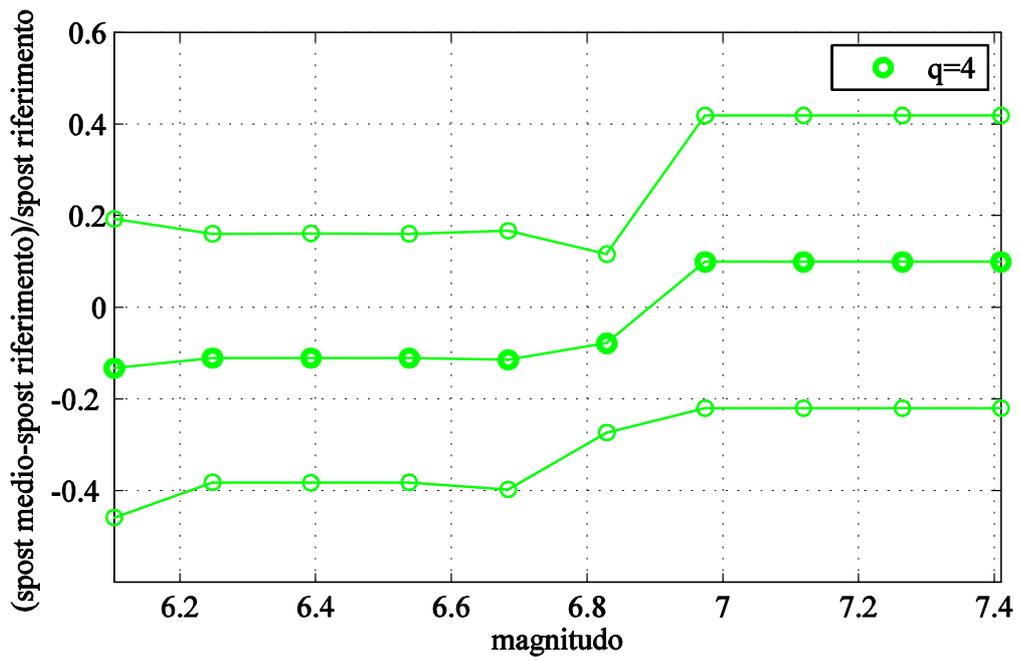


Figura 46: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=4$ e $T=0.3s$)

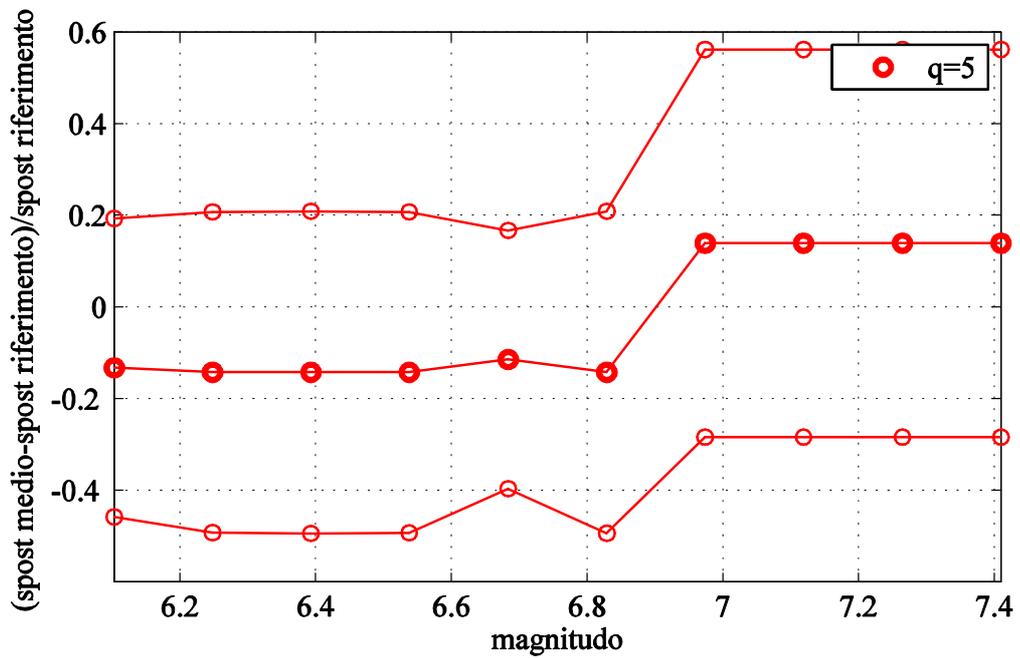


Figura 47: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=5$ e $T=0.3s$)

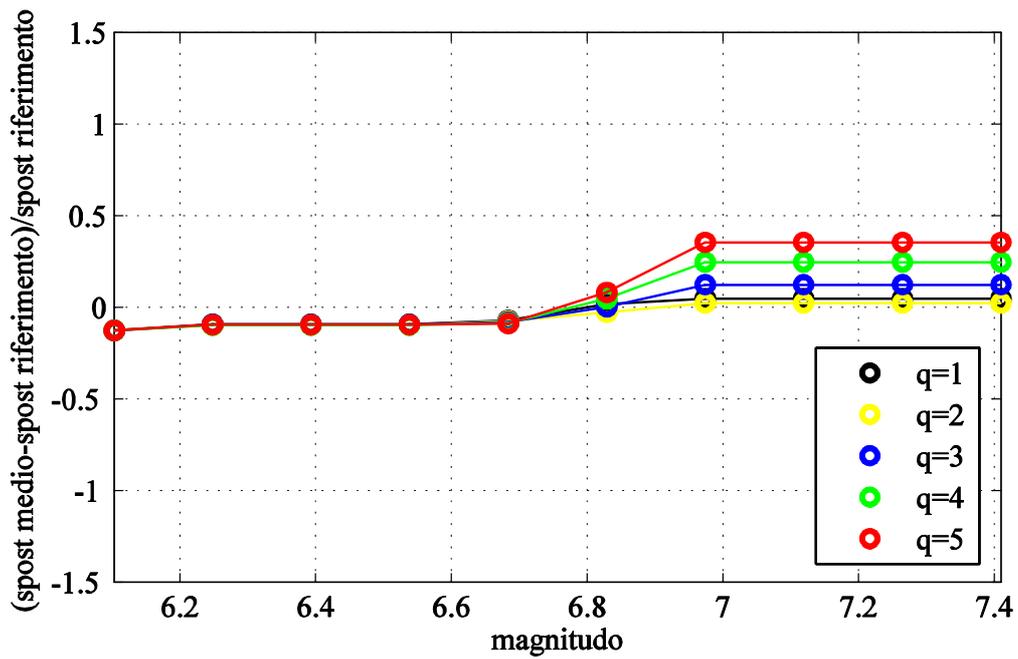


Figura 48: confronto tra Δ ottenuti effettuando diverse preselezioni in termini di magnitudo per $T=0.5s$

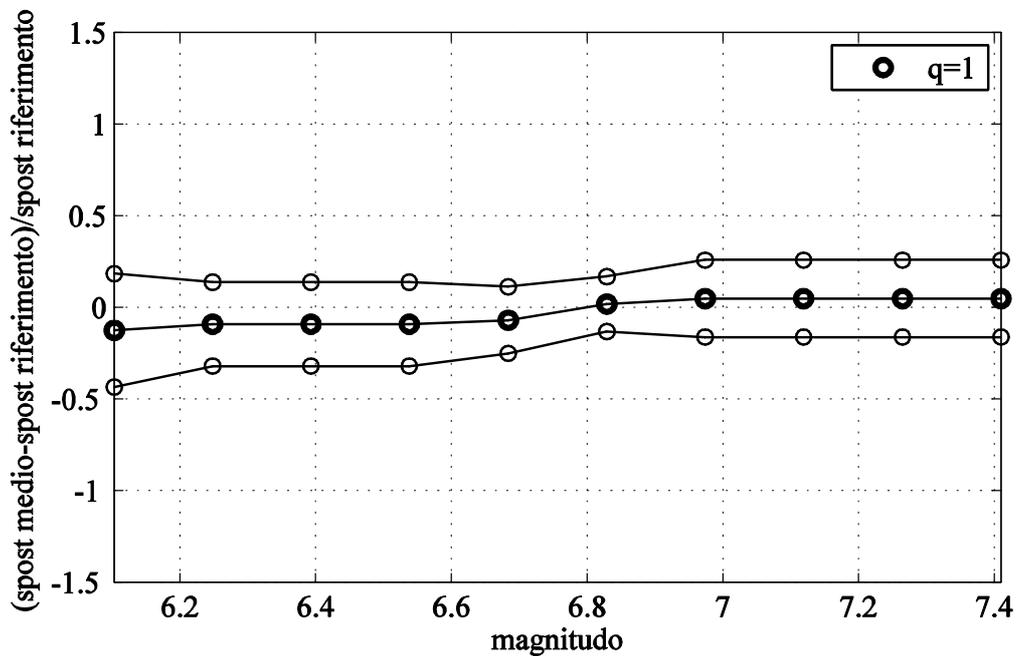


Figura 49: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=1$ e $T=0.5s$)

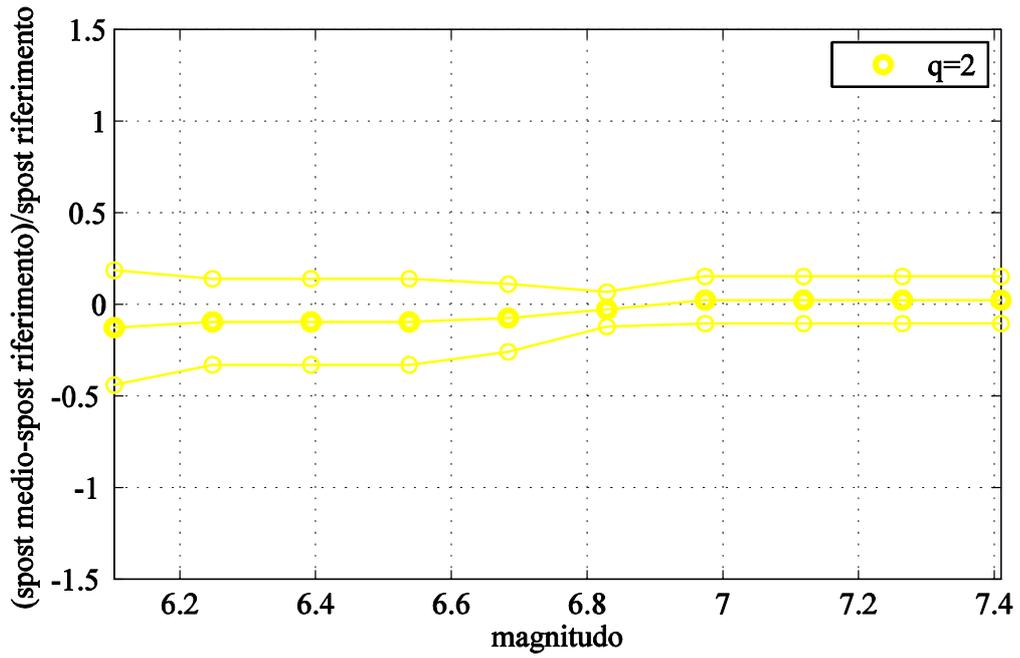


Figura 50: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili (q=2 e T=0.5s)

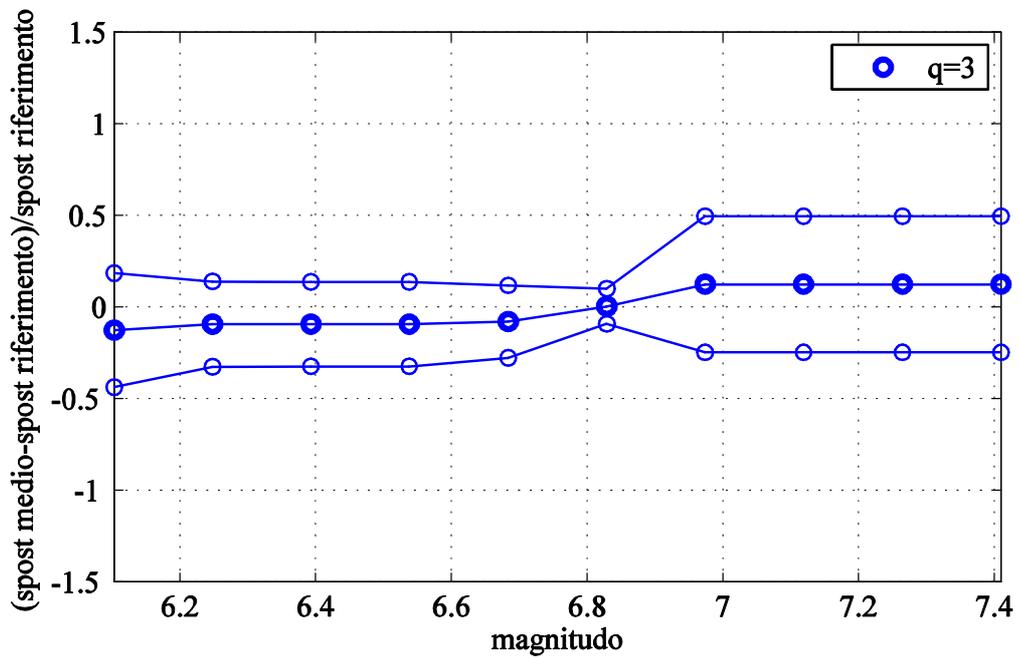


Figura 51: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili (q=3 e T=0.5s)

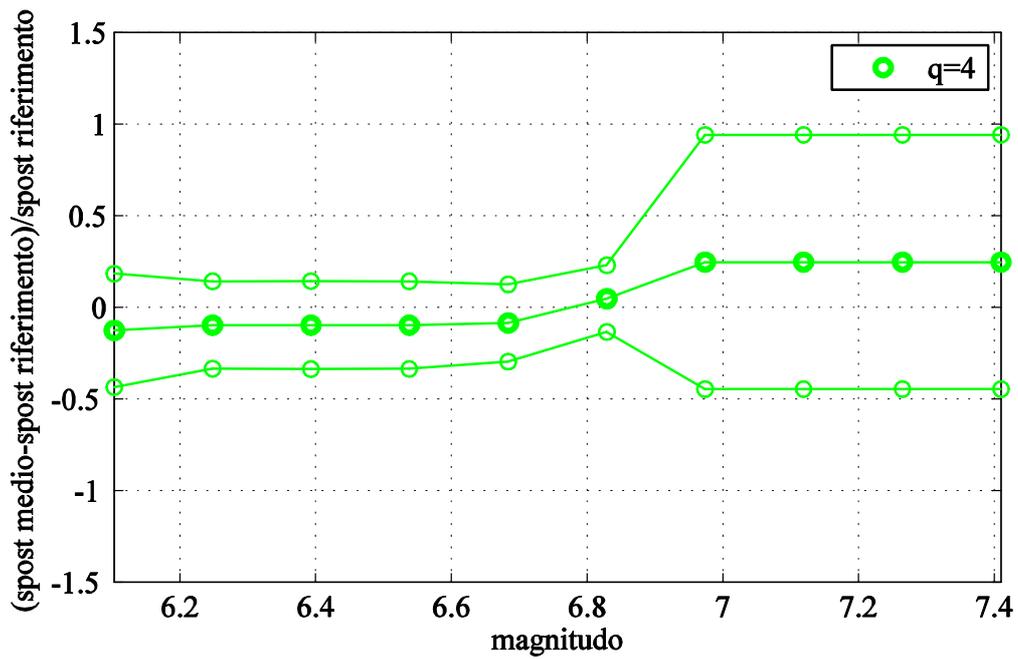


Figura 52: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=4$ e $T=0.5s$)

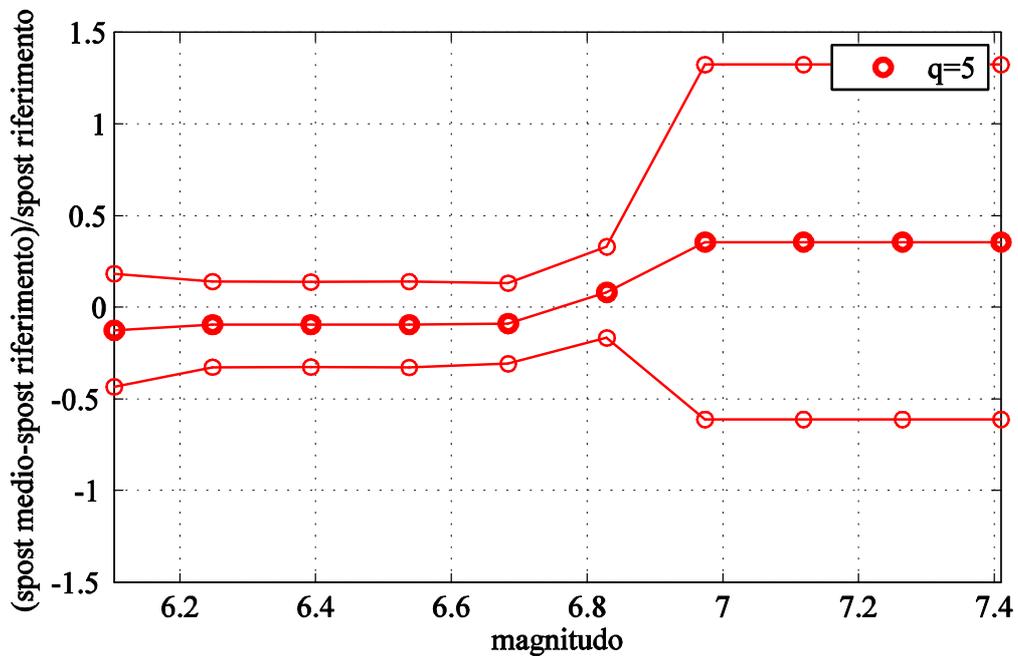


Figura 53: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=5$ e $T=0.5s$)

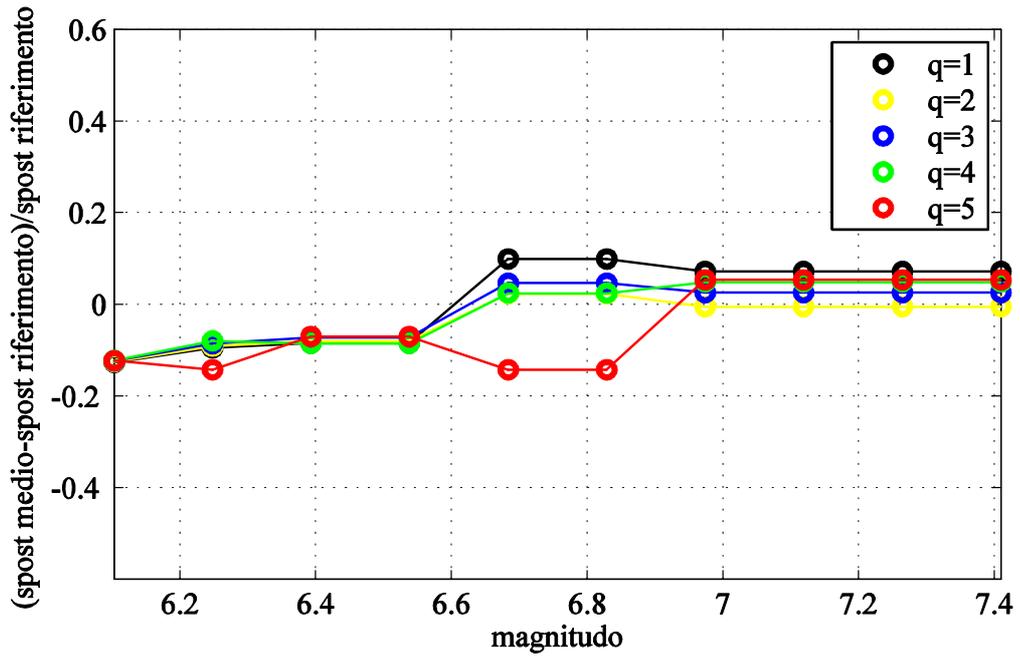


Figura 54: confronto tra Δ ottenuti effettuando diverse preselezioni in termini di magnitudo per $T=1s$

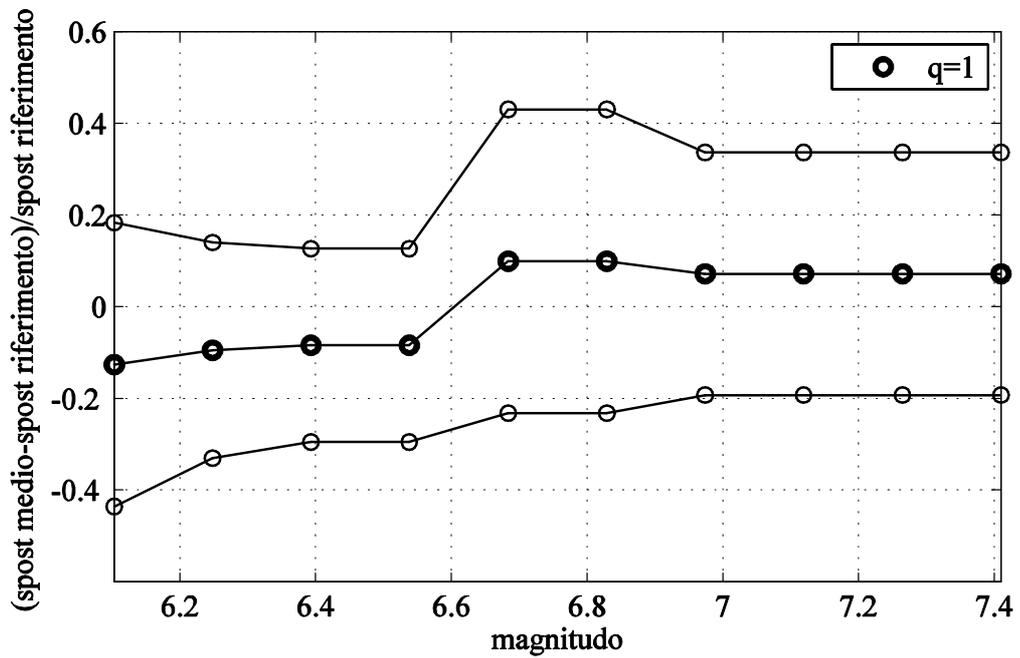


Figura 55: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=1$ e $T=1s$)

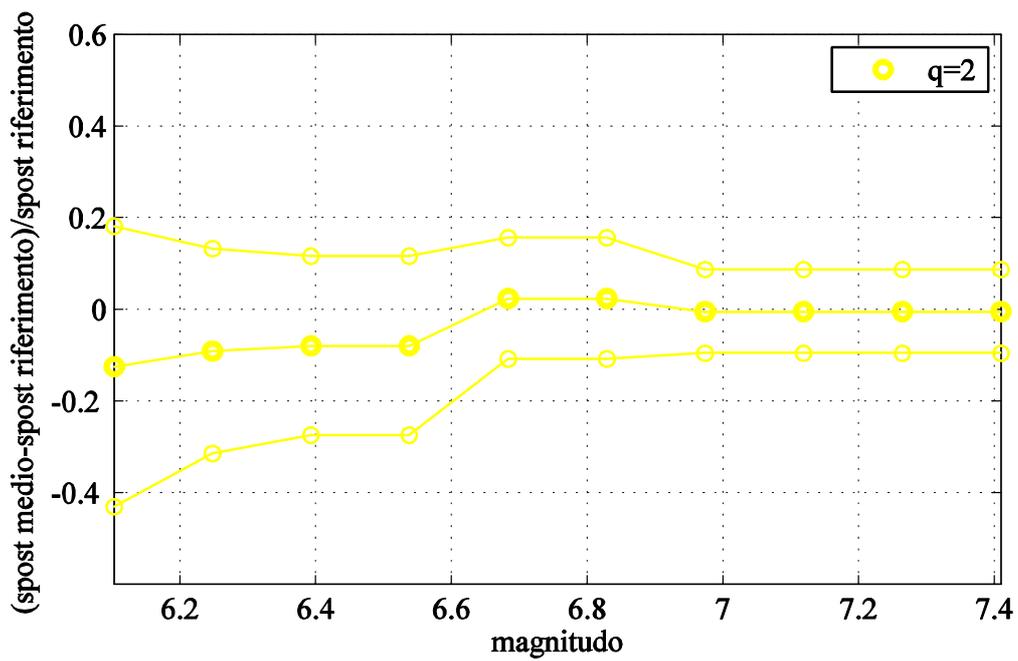


Figura 56: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili (q=2 e T=1s)

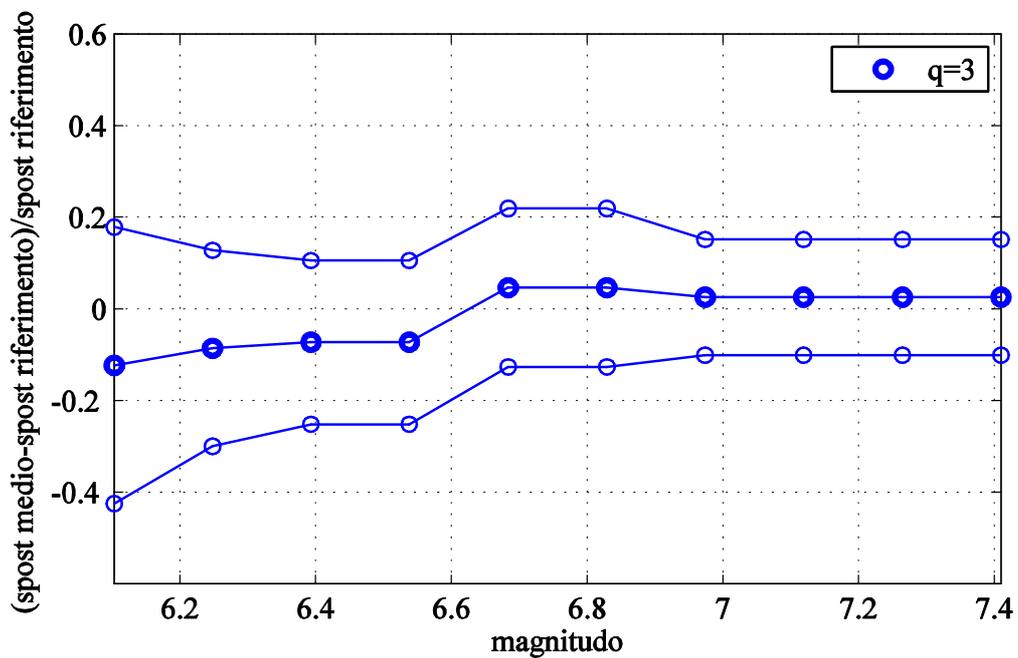


Figura 57: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili (q=3 e T=1s)

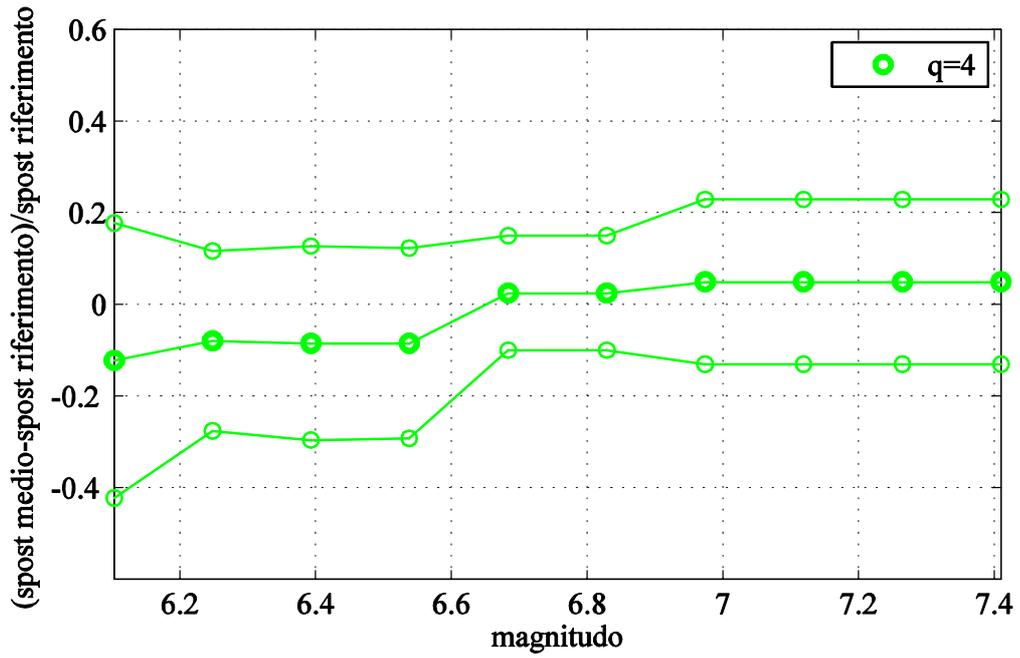


Figura 58: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili (q=4 e T=1s)

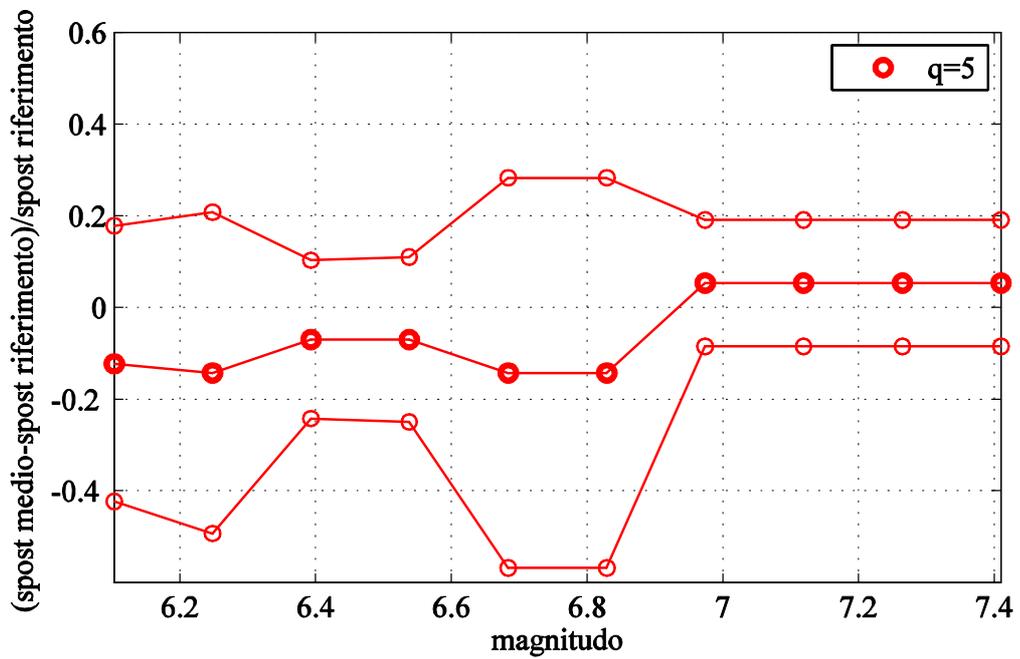


Figura 59: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili (q=5 e T=1s)

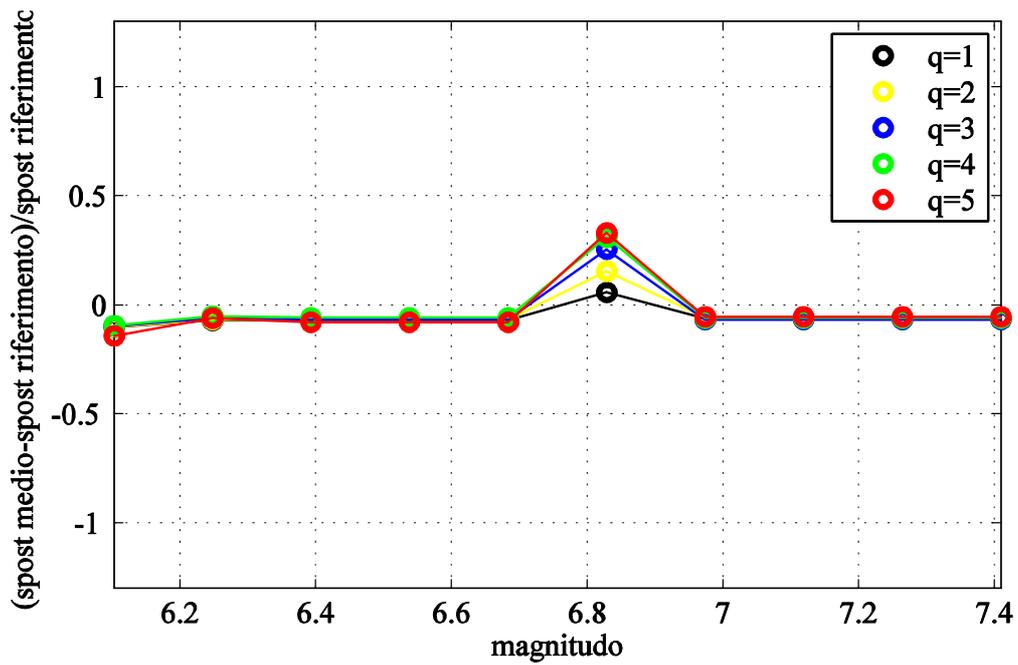


Figura 60: confronto tra Δ ottenuti effettuando diverse preselezioni in termini di magnitudo per T=2s

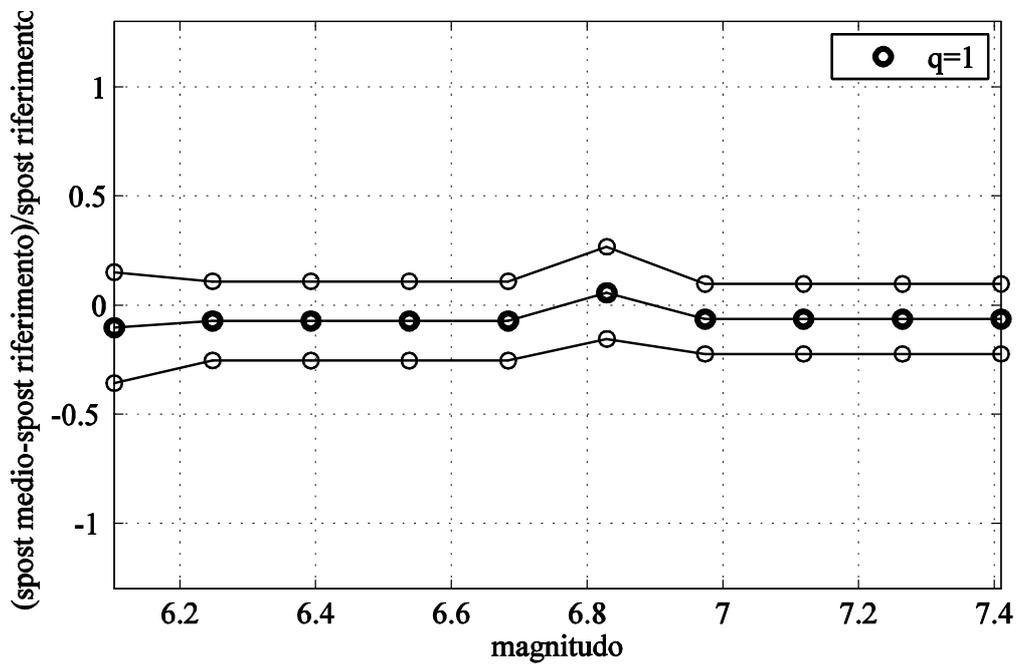


Figura 61: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili (q=1 e T=2s)

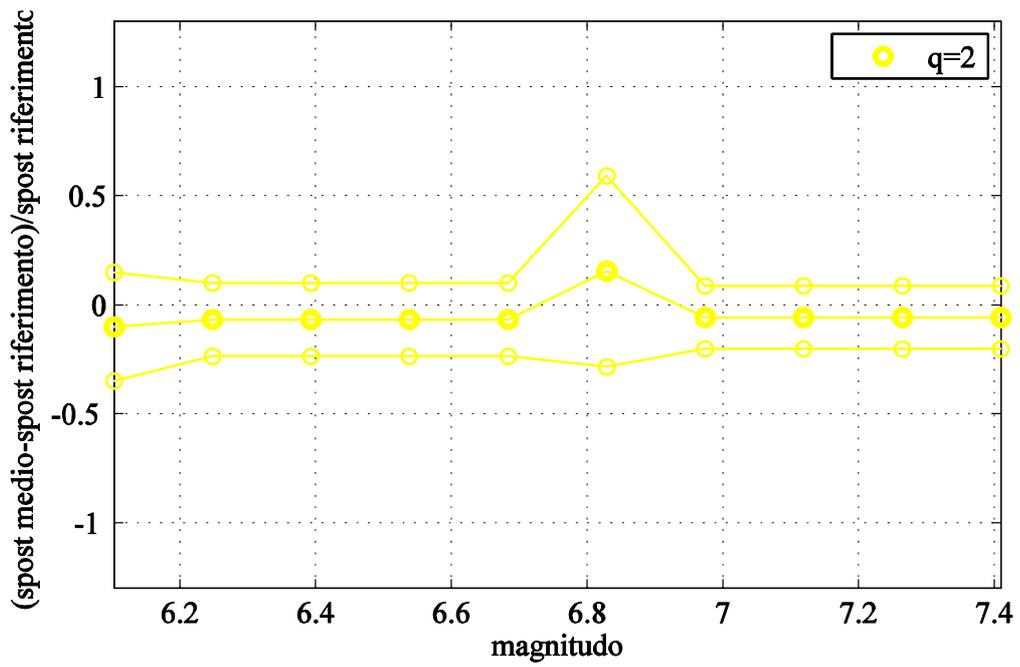


Figura 62: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili (q=2 e T=2s)

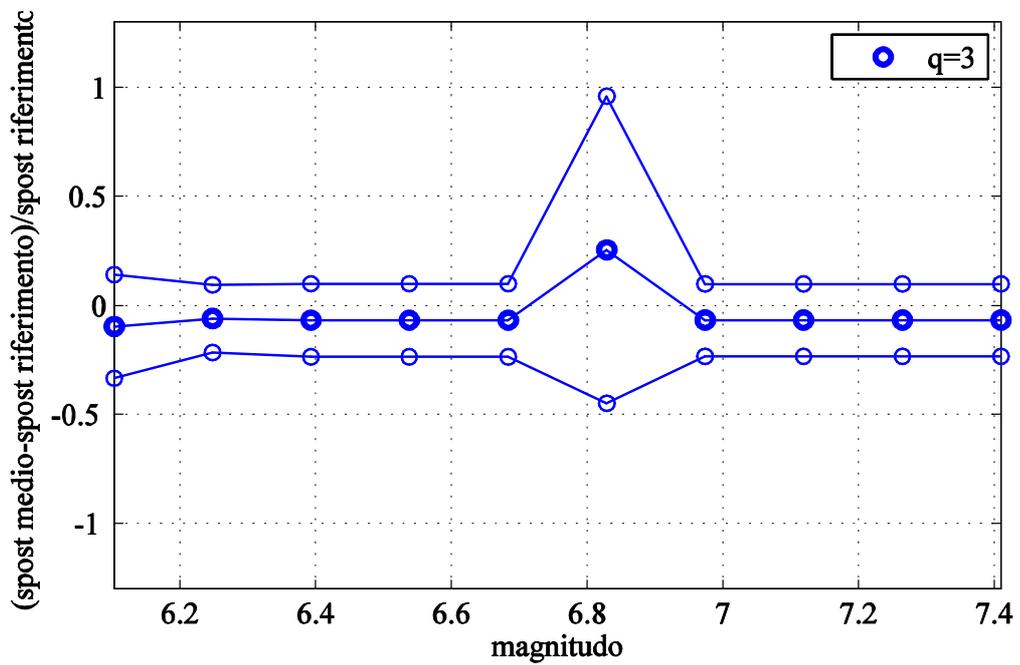


Figura 63: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili (q=3 e T=2s)

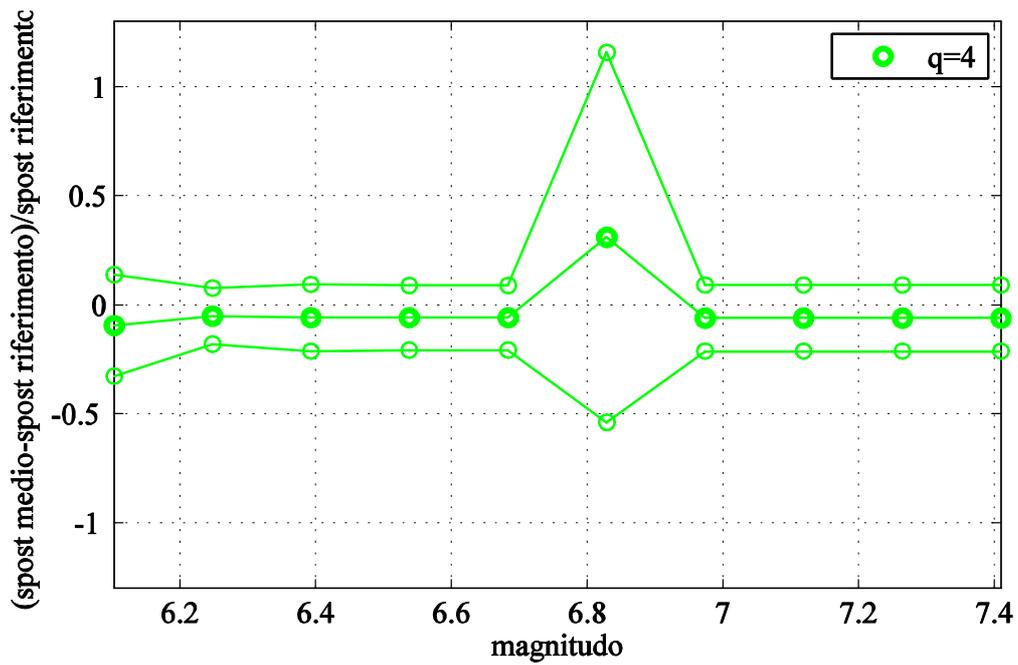


Figura 64: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=4$ e $T=2s$)

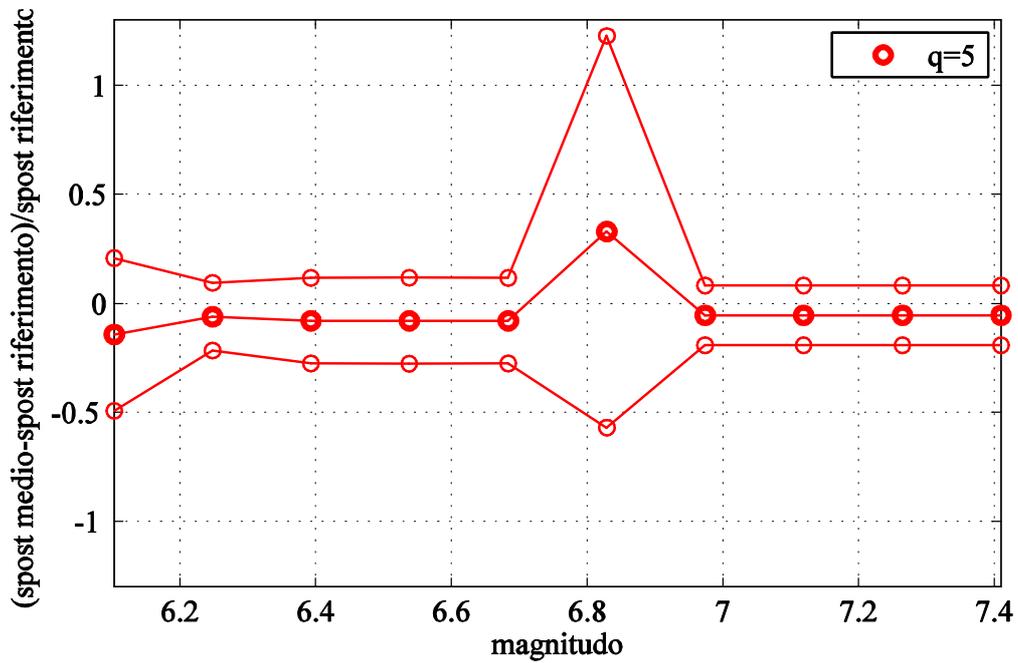


Figura 65: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di magnitudo ammissibili ($q=5$ e $T=2s$)

Gli accelerogrammi presenti nel database possono essere preselezionati anche in base alla distanza del loro punto d'origine dal sito dove è collocata la struttura. Analogamente al caso precedente quindi sono state considerate le registrazioni per le quali valesse la relazione: $0 < R_{JB,registrazione} \leq R_{JB,fissata}$.

E' stato quindi fatta variare $R_{JB,fissata}$ per poter modificare il numero di time histories considerabili e il risultato in termini di spostamento medio e deviazione standard è riportato in seguito.

Si noti che, a differenza del caso precedente, questa analisi ha prodotto risultati di difficile generalizzazione, infatti per $T=0.1s$ e $T=0.3s$ la preselezione non influenza gli spostamenti degli oscillatori, verosimilmente perché il gruppo analizzato è costituito da accelerogrammi associati a distanze molto piccole che per questo motivo non vengono mai scartate, per $T=0.5s$ si osserva un miglioramento nella previsione degli spostamenti se si scelgono registrazioni per le quali R_{JB} è compresa tra 0 e 12.626km. Per $T=1s$ e $T=2s$ operare una preselezione non è efficace: infatti il parametro Δ risulta minimo nell'ipotesi che la spettrocompatibilità sia calcolata a partire dall'intero database.

Per distanze minori o uguali a 10.101km la selezione degli accelerogrammi risulta troppo restrittiva, infatti le registrazioni che rimangono sono meno di 7.

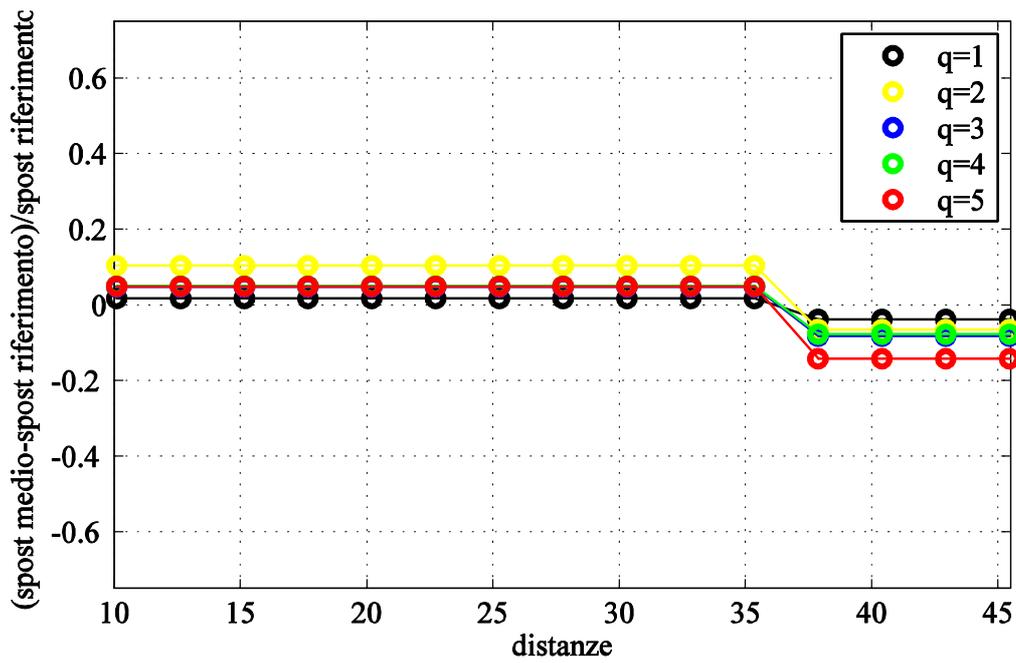


Figura 66: confronto tra Δ ottenuti effettuando diverse preselezioni in termini di distanza per $T=0.1s$

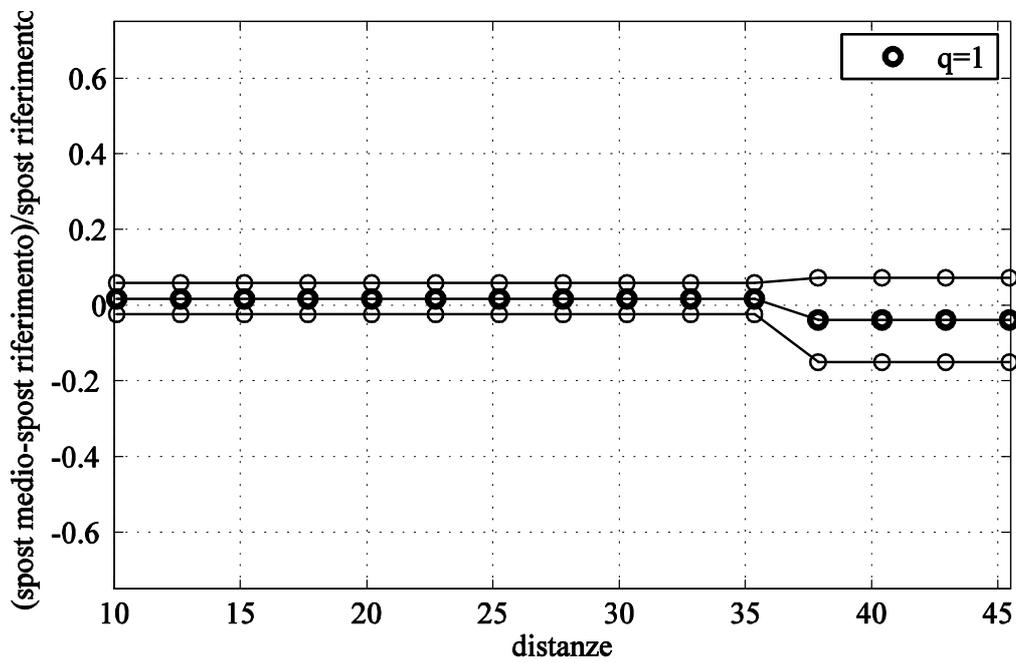


Figura 67: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=1$ e $T=0.1s$)

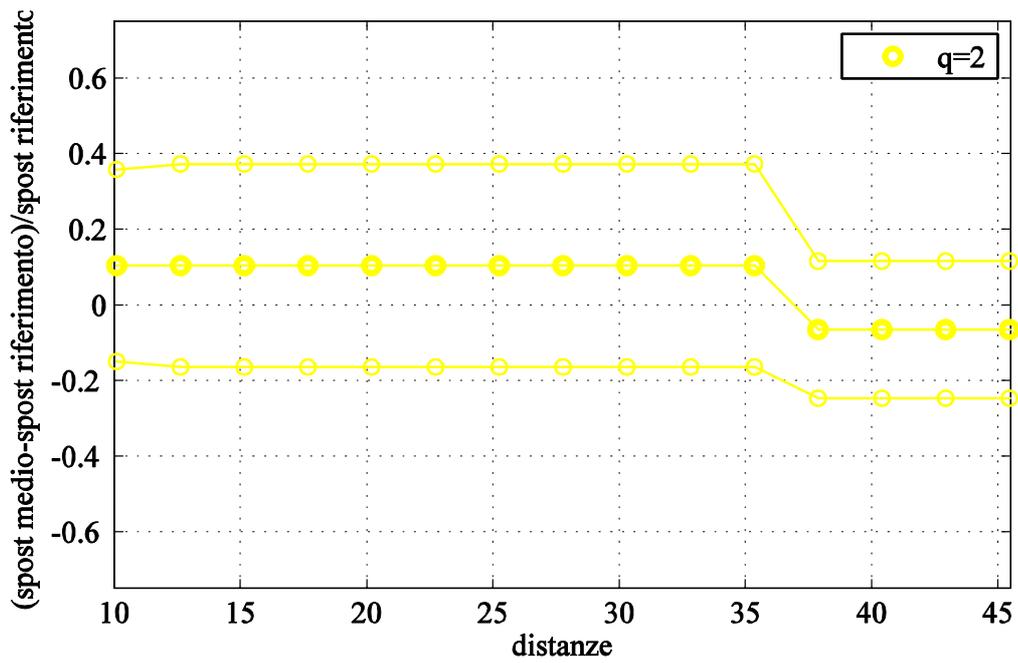


Figura 68: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili (q=2 e T=0.1s)

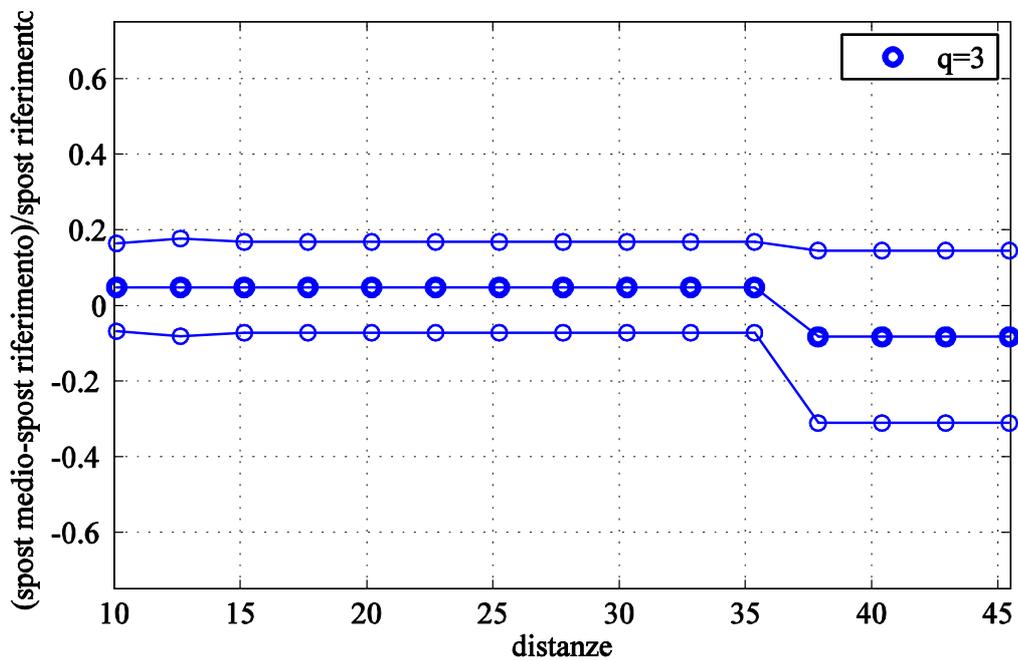


Figura 69: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili (q=3 e T=0.1s)

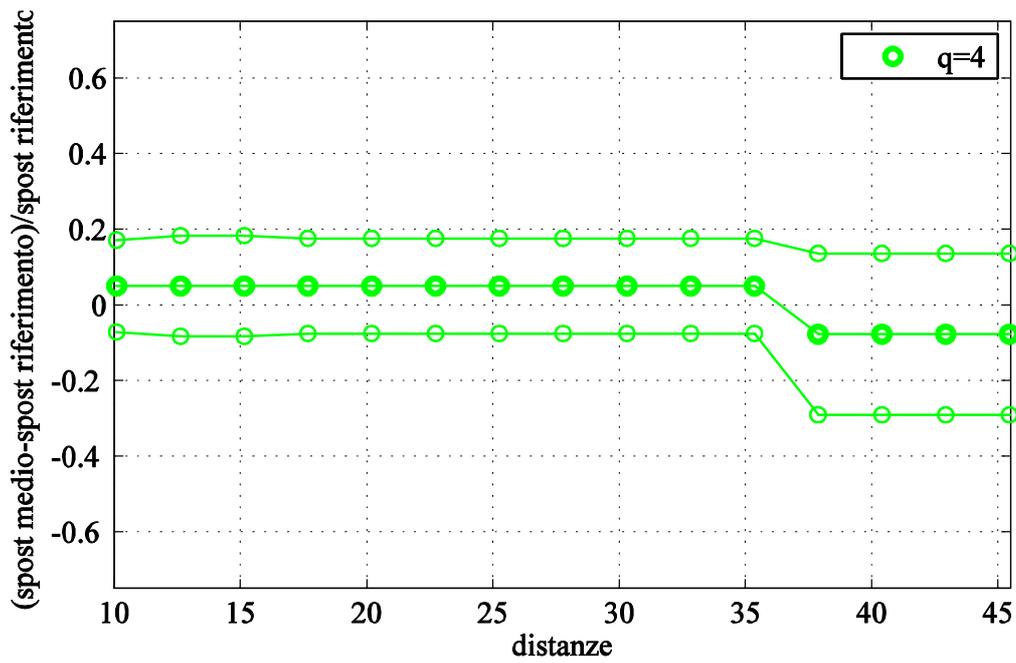


Figura 70: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili (q=4 e T=0.1s)

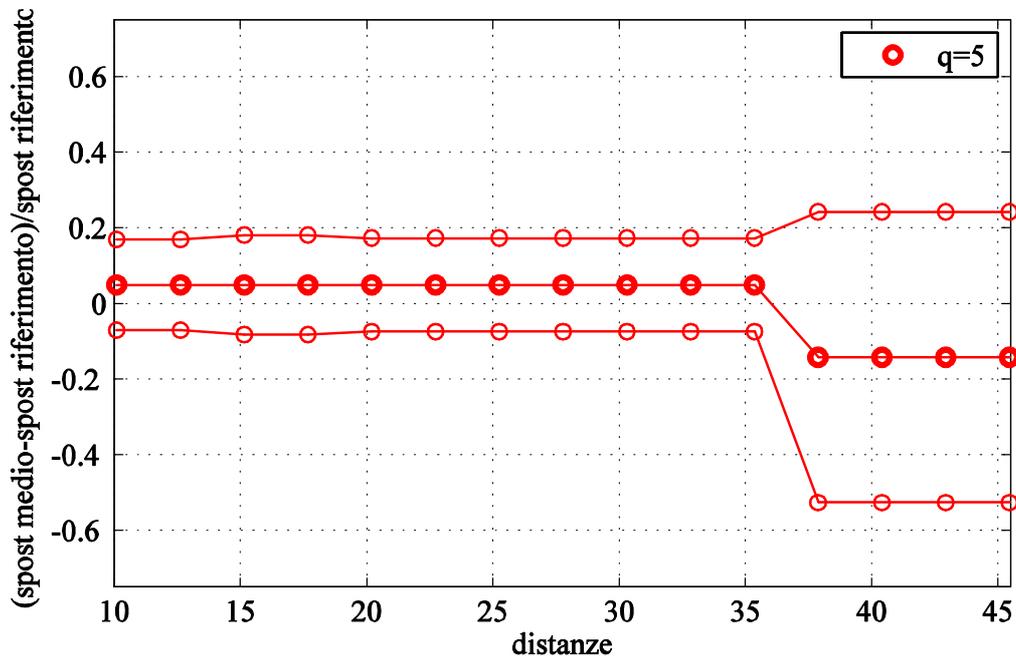


Figura 71: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili (q=5 e T=0.1s)

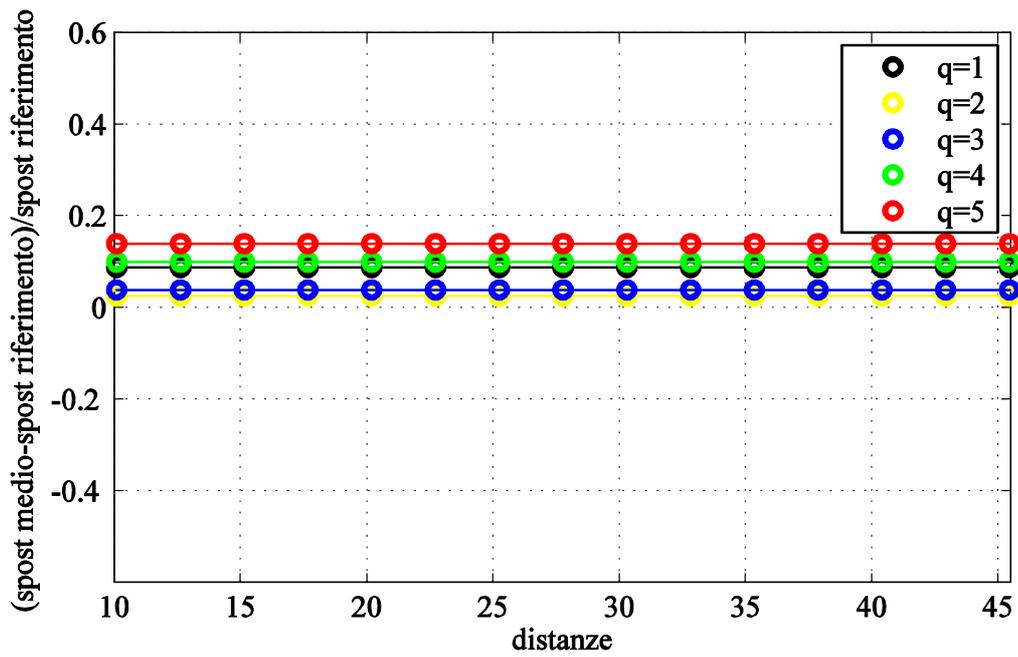


Figura 72: confronto tra Δ ottenuti effettuando diverse preselezioni in termini di distanza per $T=0.3s$

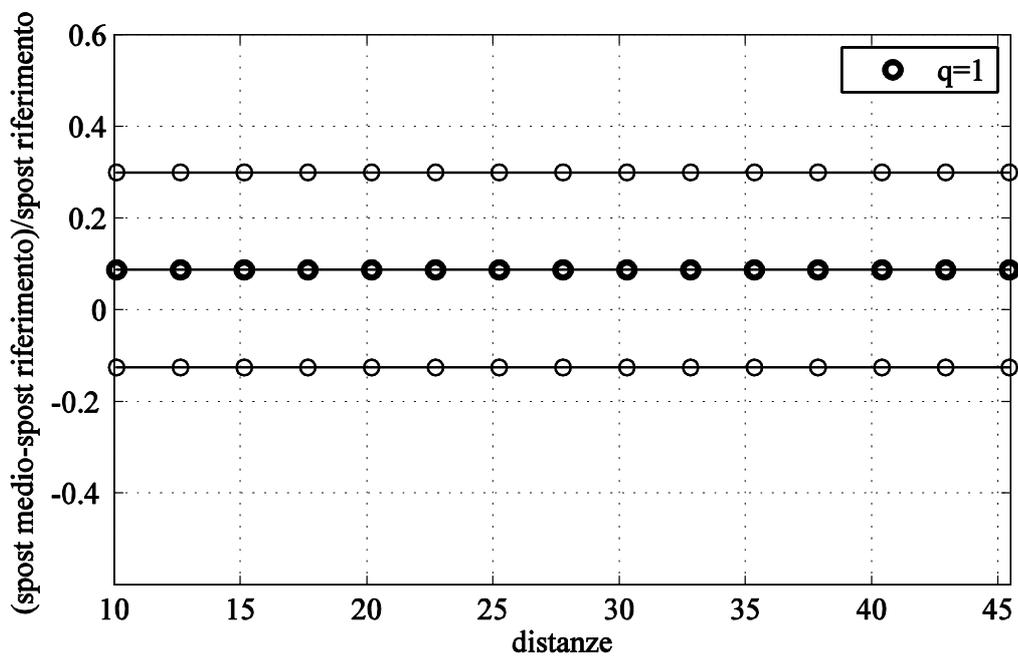


Figura 73: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=1$ e $T=0.3s$)

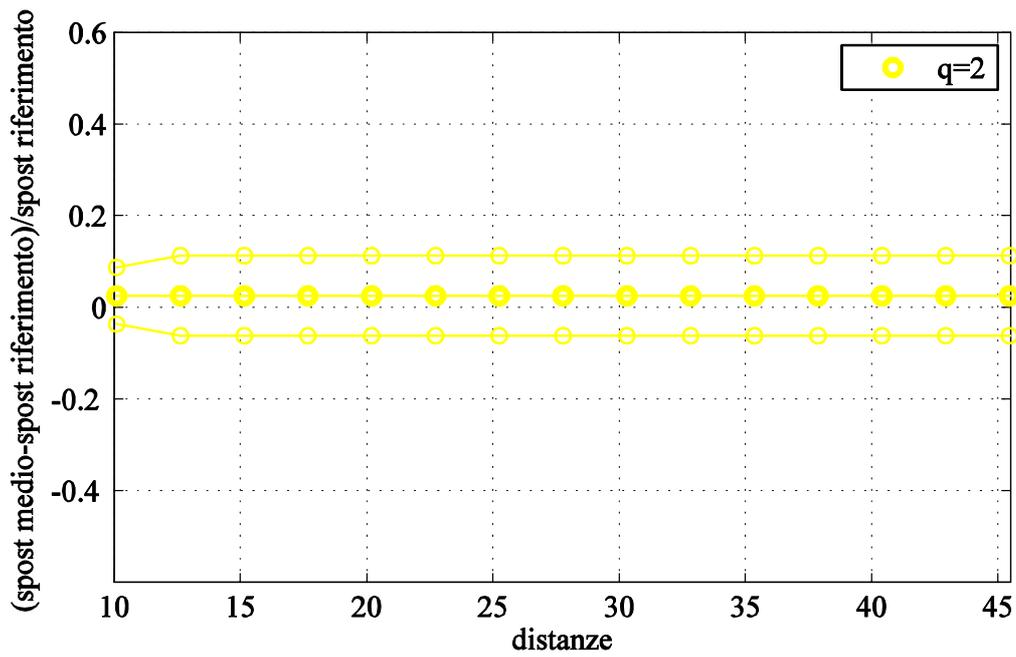


Figura 74: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=2$ e $T=0.3s$)

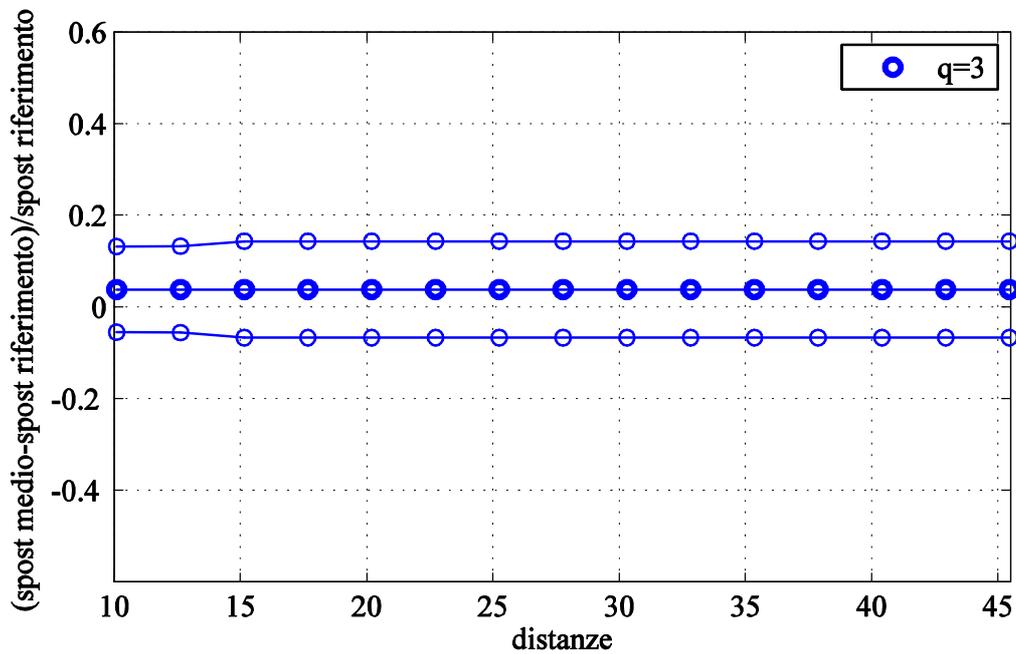


Figura 75: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=3$ e $T=0.3s$)

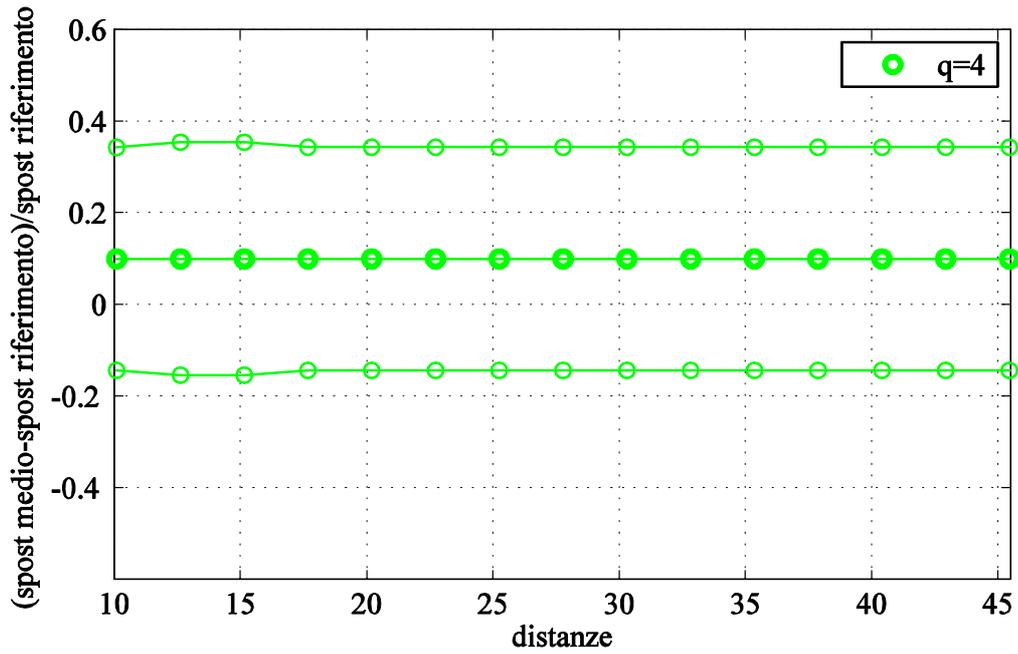


Figura 76: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=4$ e $T=0.3s$)

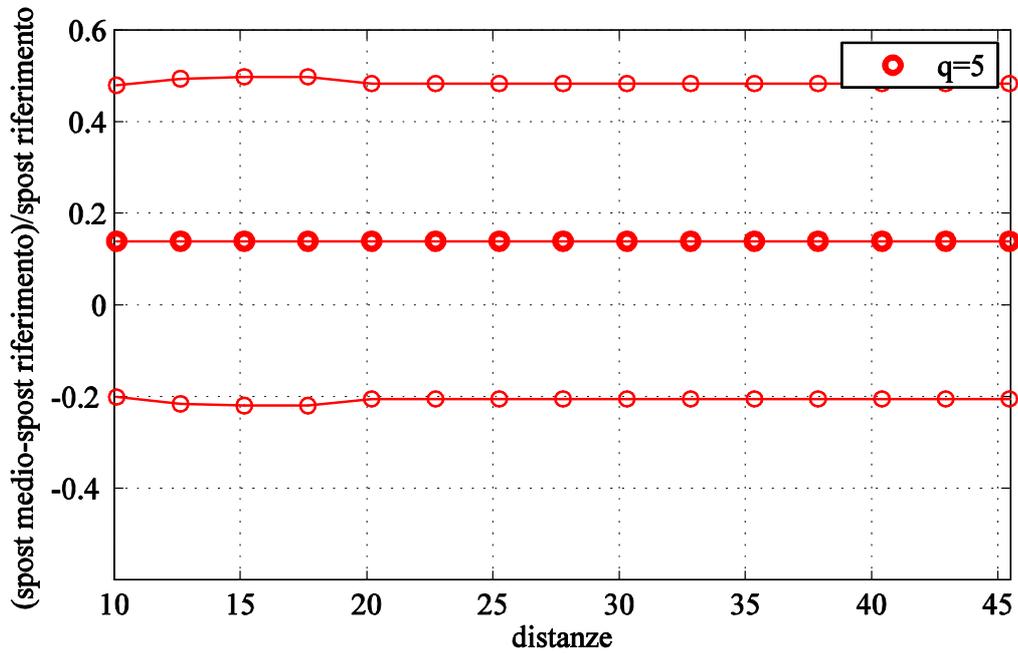


Figura 77: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=5$ e $T=0.3s$)

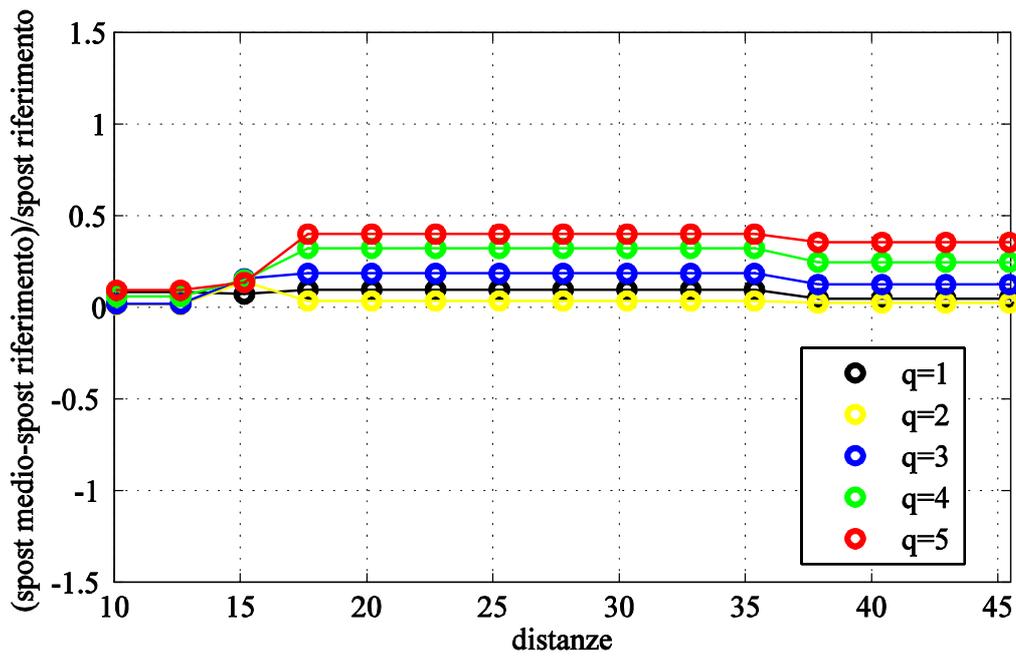


Figura 78: confronto tra Δ ottenuti effettuando diverse preselezioni in termini di distanza per $T=0.5s$

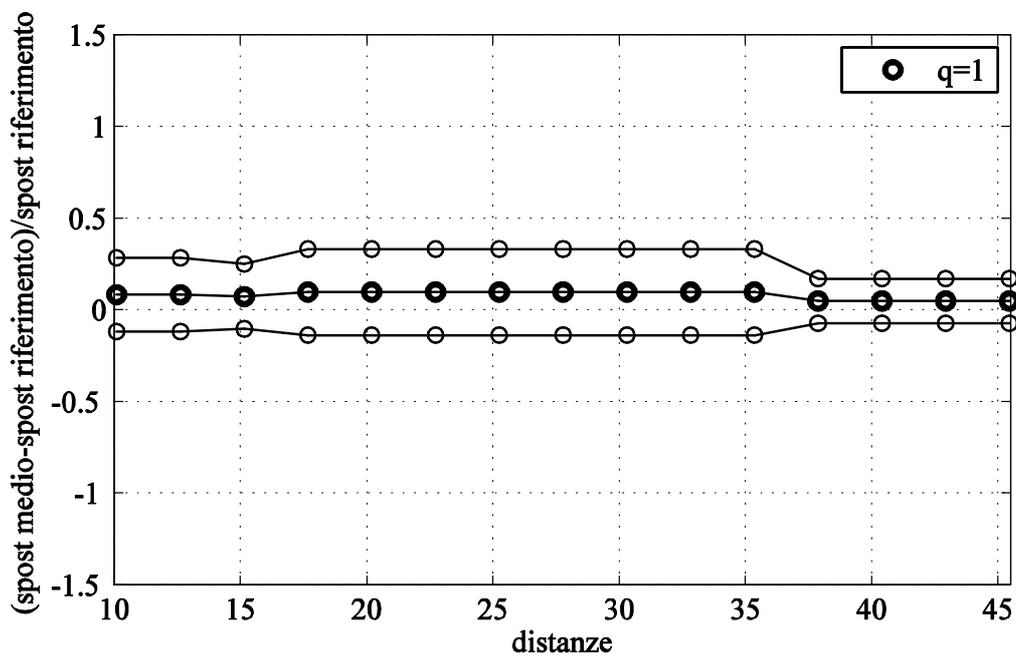


Figura 79: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=1$ e $T=0.5s$)

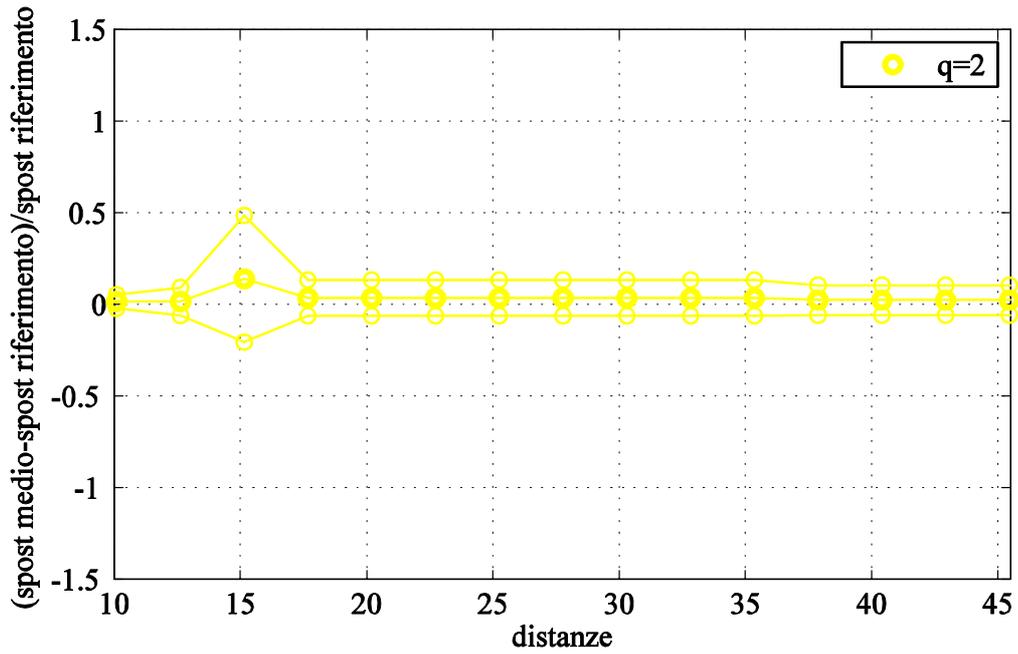


Figura 80: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=2$ e $T=0.5s$)

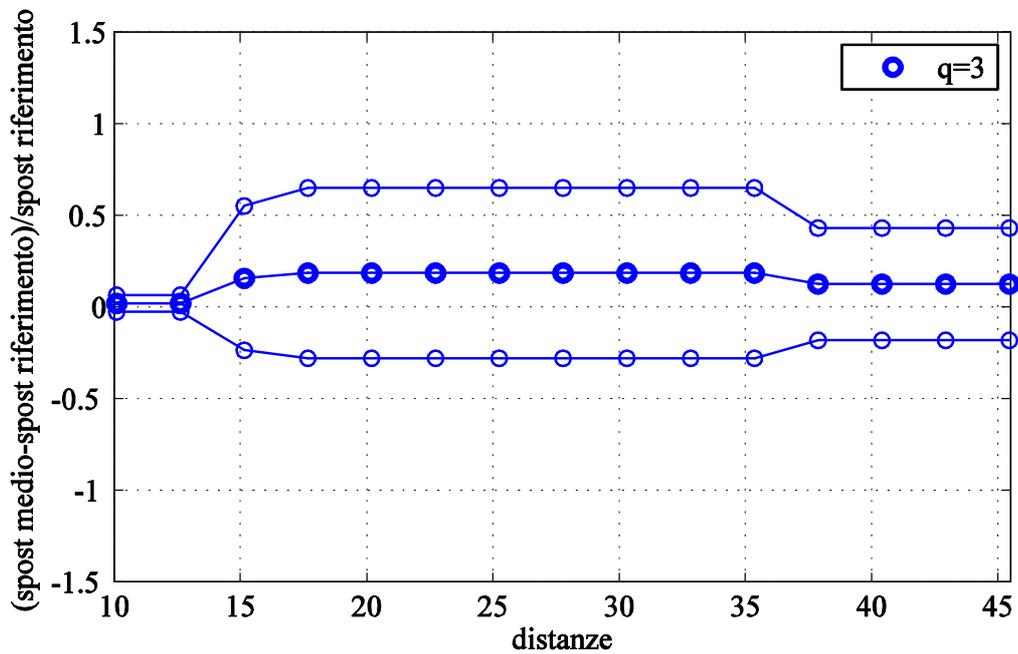


Figura 81: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=3$ e $T=0.5s$)

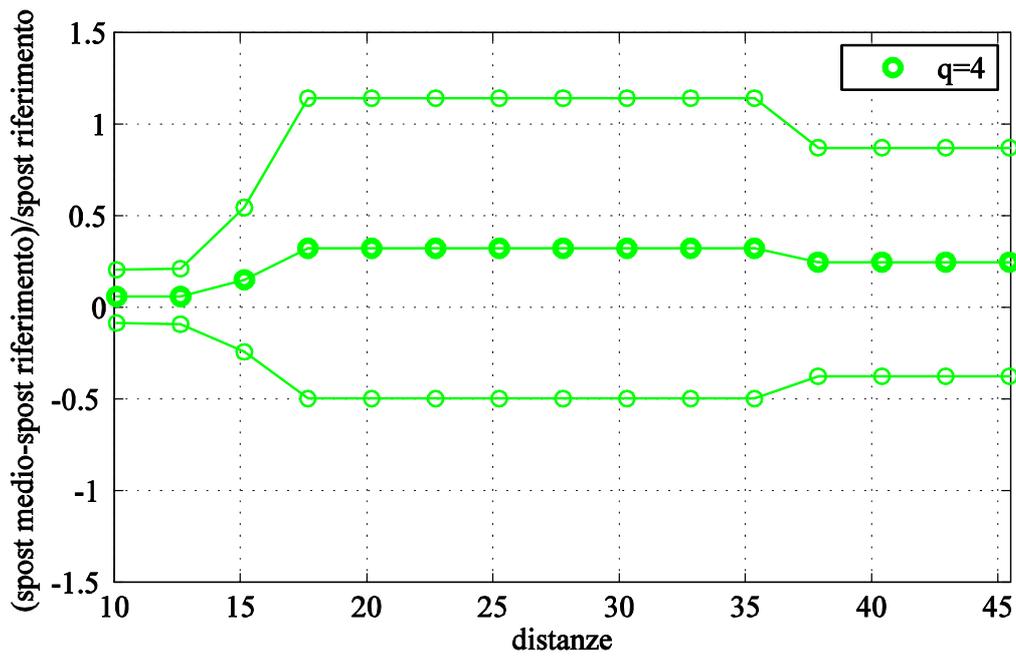


Figura 82: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=4$ e $T=0.5s$)

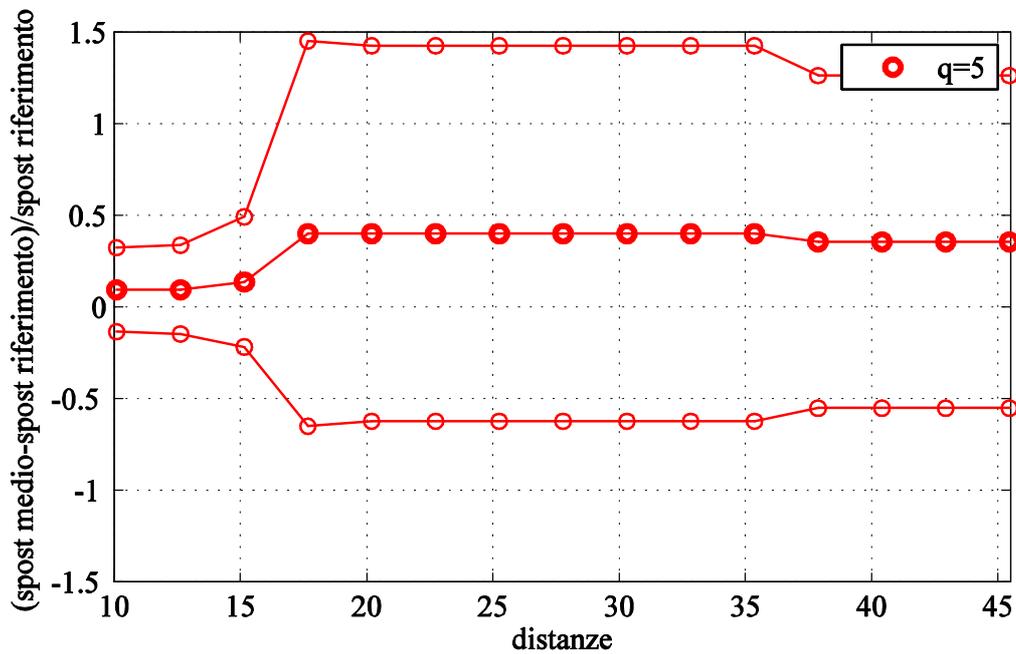


Figura 83: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=5$ e $T=0.5s$)

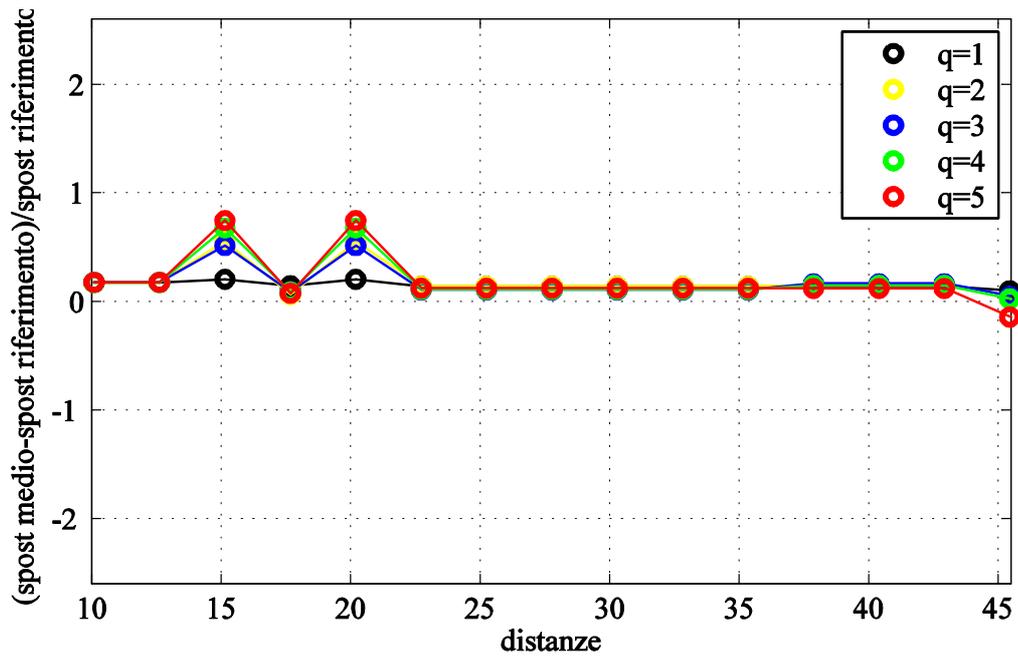


Figura 84: confronto tra Δ ottenuti effettuando diverse preselezioni in termini di distanza per $T=1s$

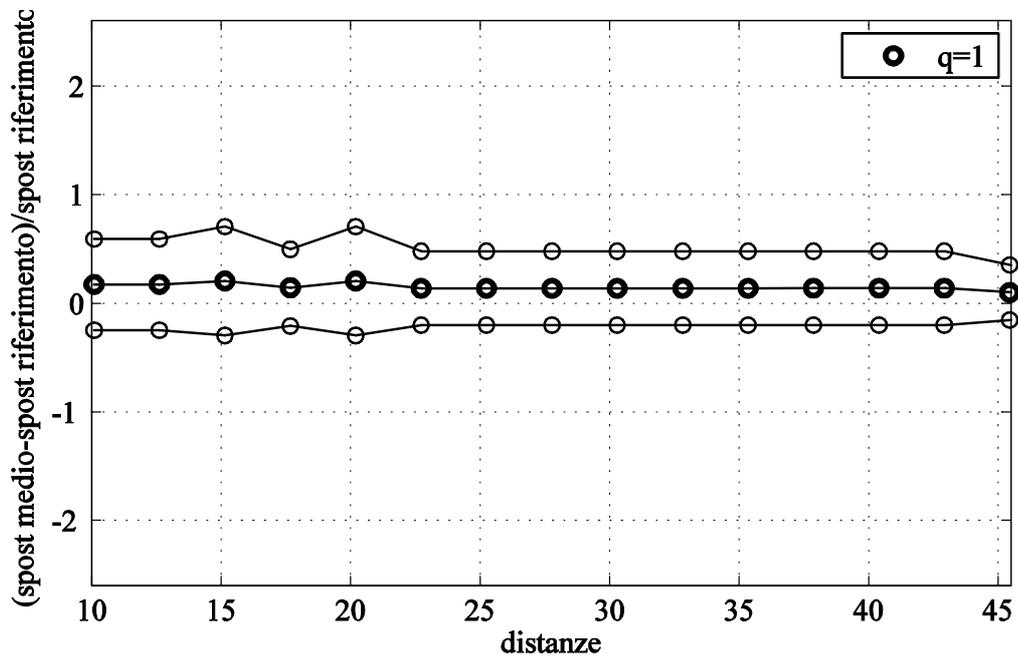


Figura 85: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=1$ e $T=1s$)

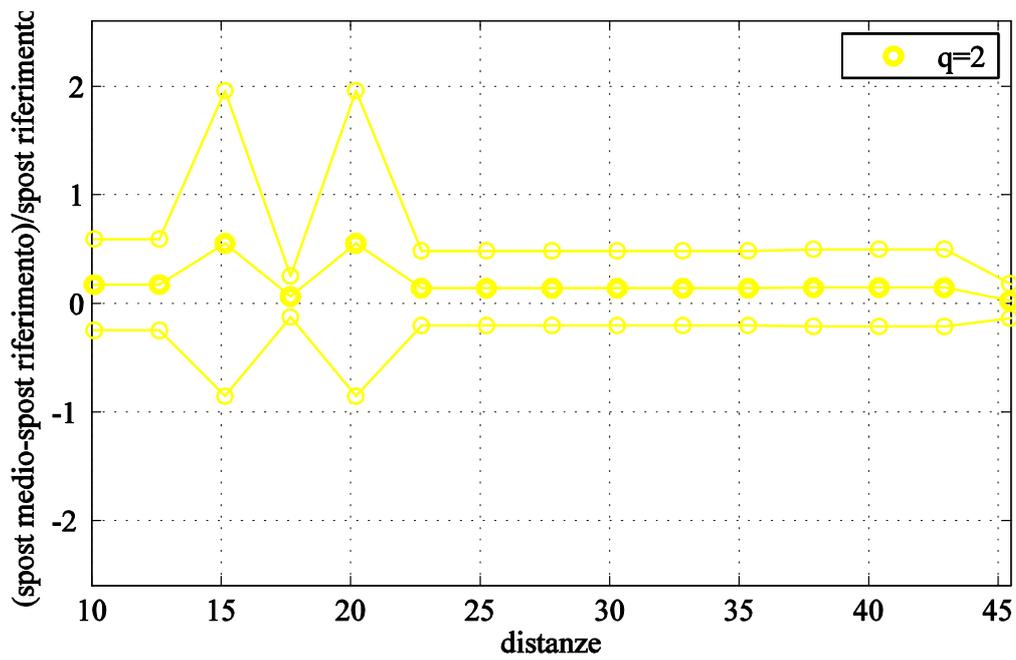


Figura 86: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili (q=2 e T=1s)

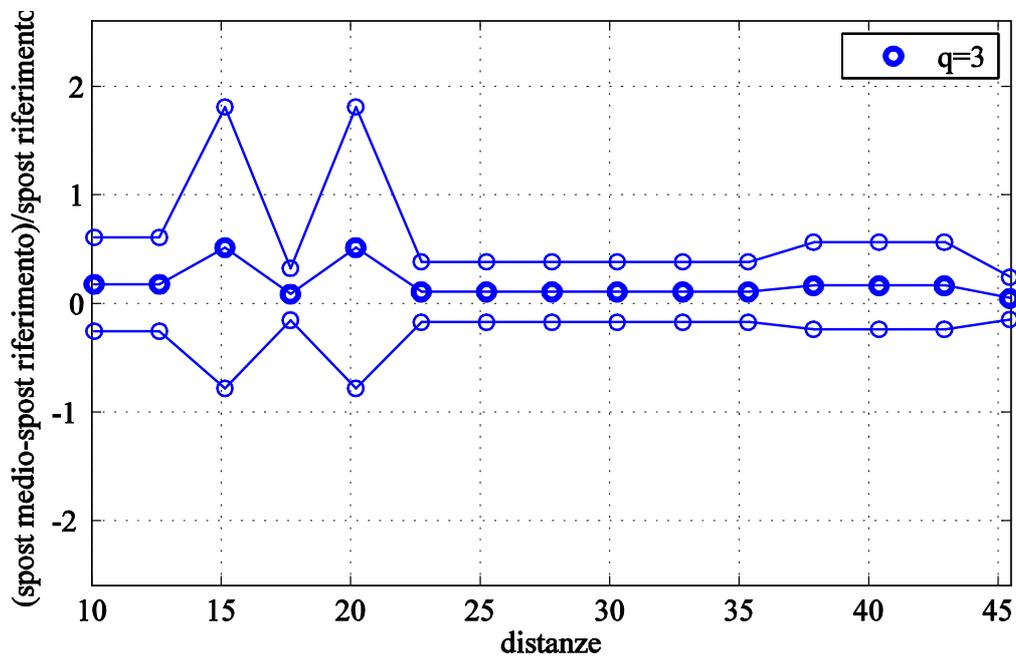


Figura 87: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili (q=3 e T=1s)

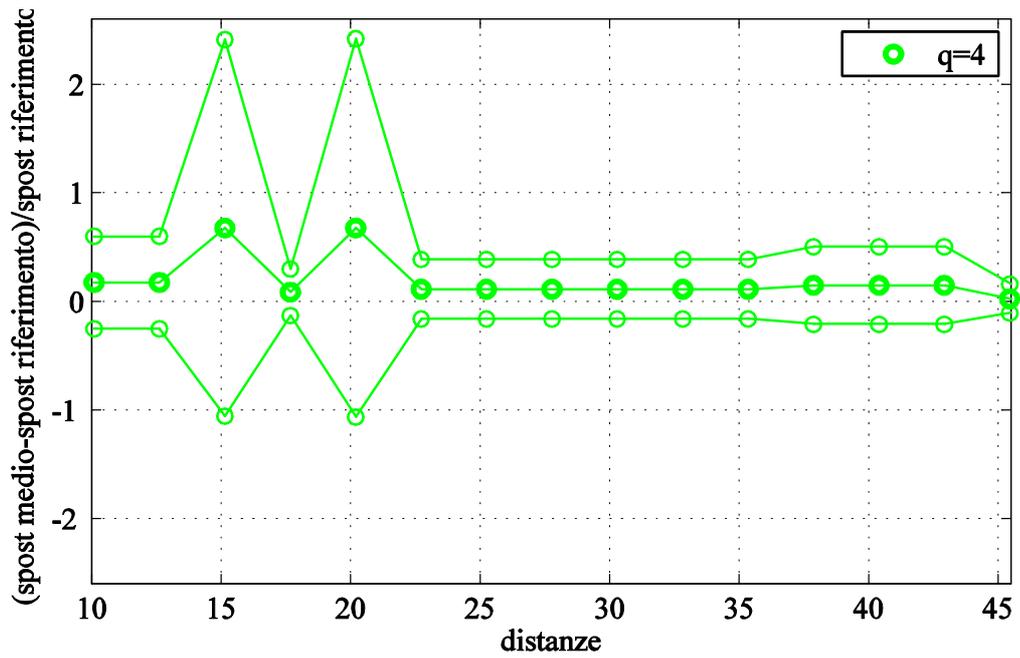


Figura 88: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili (q=4 e T=1s)

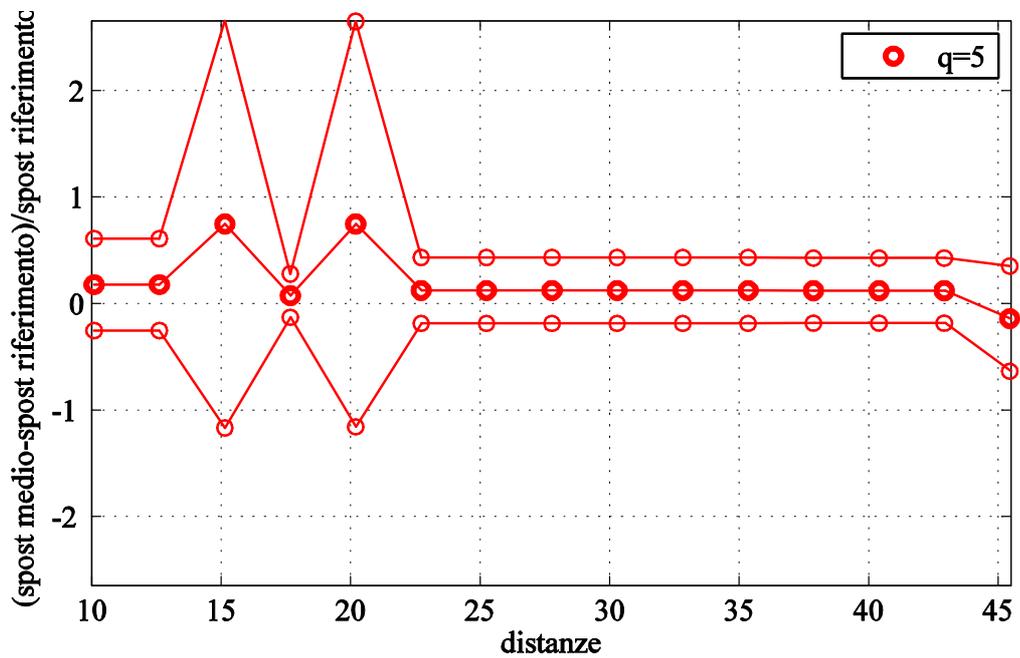


Figura 89: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili (q=5 e T=1s)

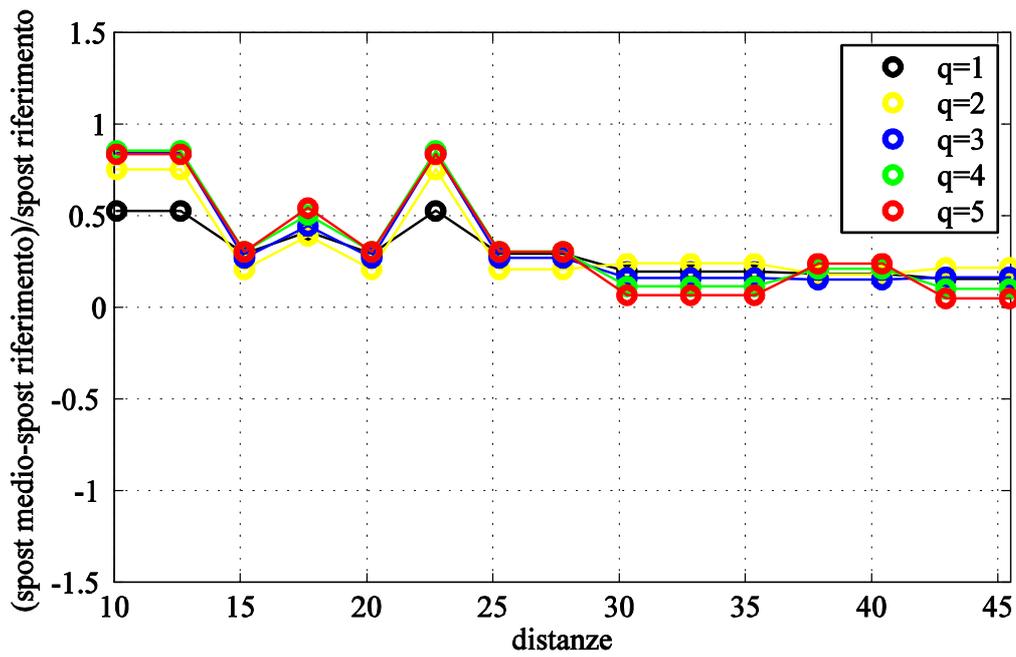


Figura 90: confronto tra Δ ottenuti effettuando diverse preselezioni in termini di distanza per $T=2s$

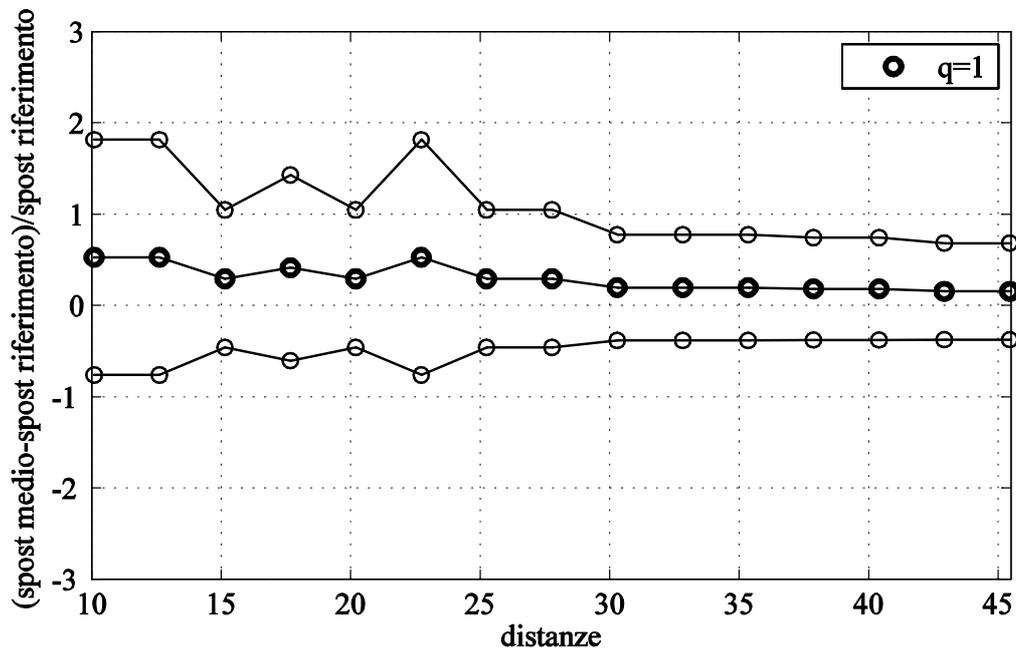


Figura 91: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=1$ e $T=2s$)

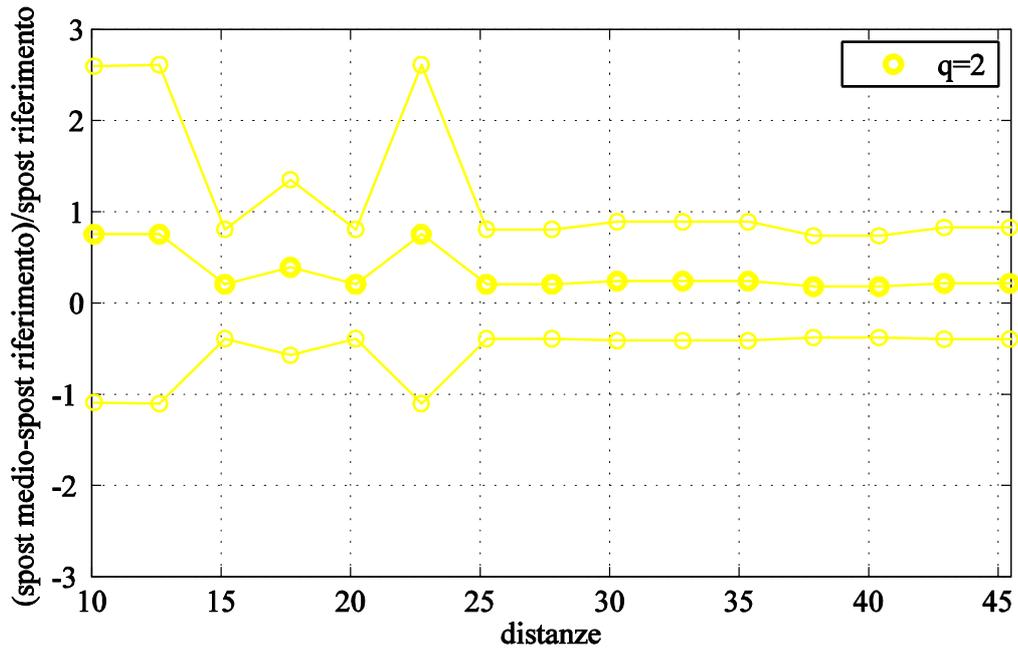


Figura 92: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=2$ e $T=2s$)

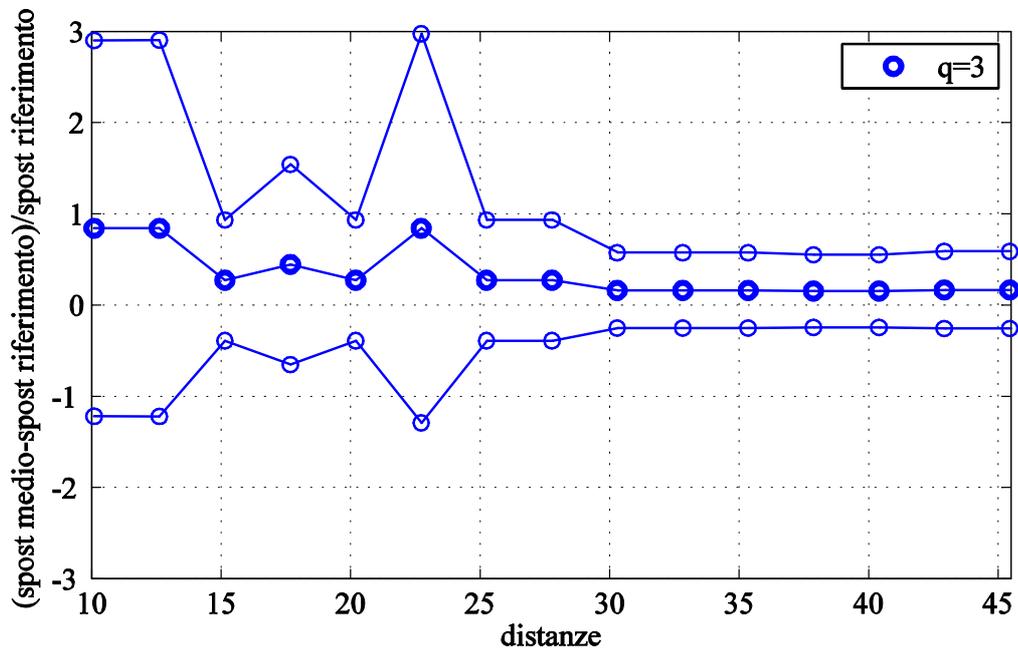


Figura 93: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili ($q=3$ e $T=2s$)

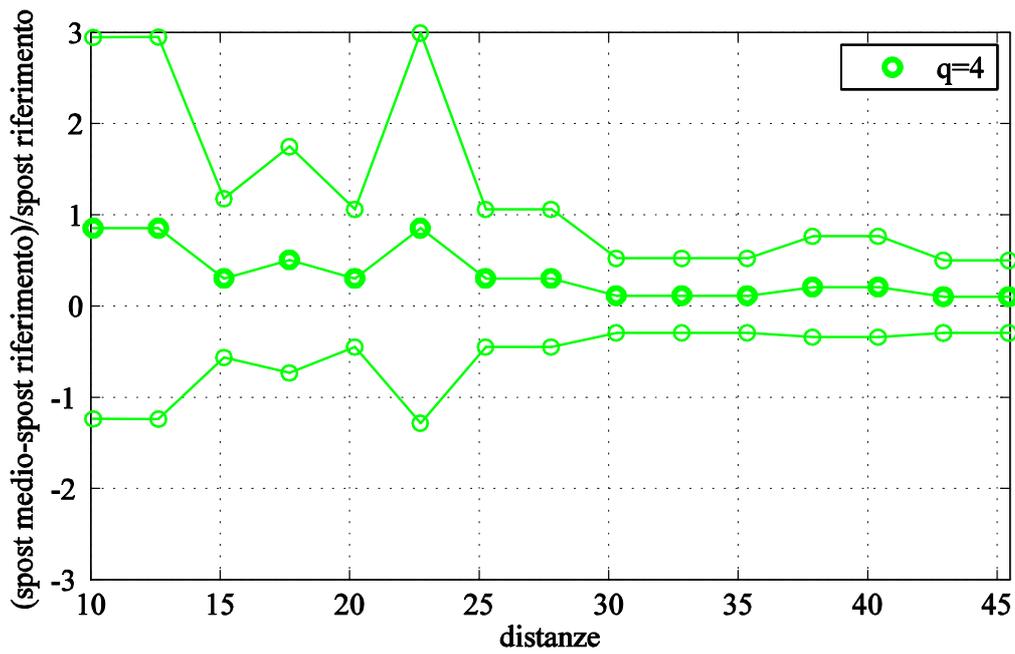


Figura 94: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili (q=4 e T=2s)

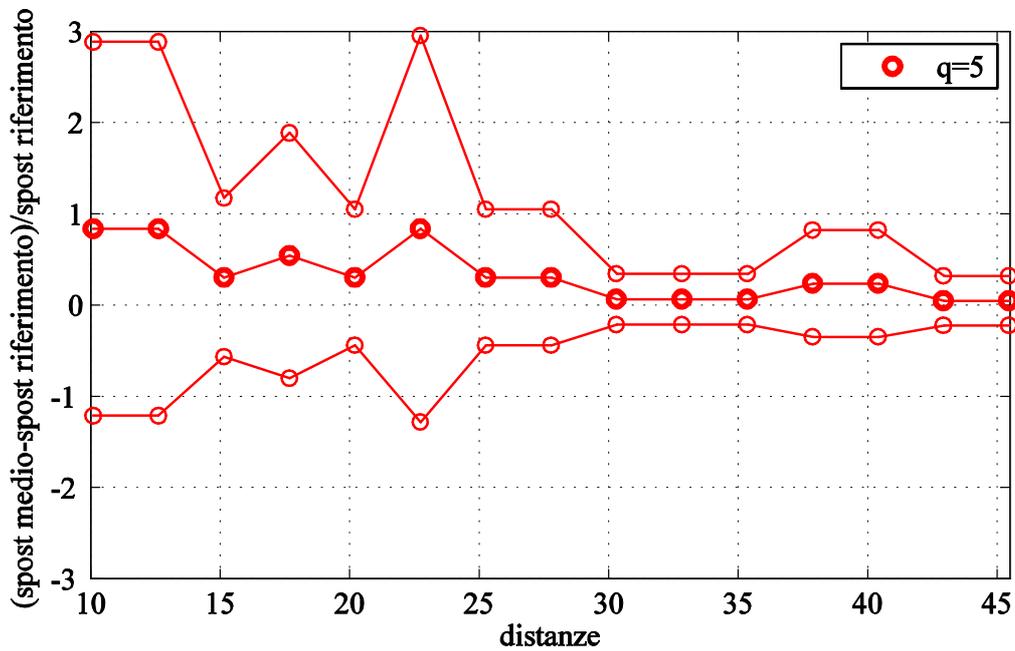


Figura 95: andamento dello spostamento medio e della deviazione standard al variare dell'intervallo di distanze ammissibili (q=5 e T=2s)

Concludendo si possono fare due ulteriori considerazioni:

la prima riguarda i fattori di struttura analizzati: si nota infatti che gli spostamenti associati ai q piccoli hanno valori in generale più simili a quelli elastici rispetto a quelli ottenuti per q grandi. Questa osservazione trova la sua giustificazione nel modo in cui sono stati definiti gli oscillatori: per $q=4$ e $q=5$, infatti, le deformazioni plastiche sono di entità notevole e quindi la differenza con lo spostamento del caso elastico risulta marcata.

In ultimo si vogliono confrontare i grafici con i risultati ottenuti dalla disaggregazione (riportati in tabella 21): mentre una preselezione in termini di distanza non risulta correlata allo scenario sismico più significativo dal punto di vista della pericolosità, il campo di magnitudo considerabili può essere ristretto ad un intervallo di ampiezza 0.4M intorno al valore fornito dalla disaggregazione. Questo risultato è perfettamente coerente con quanto proposto da Bommer e Acevedo (2004).

	magnitudo	distanza
T=0.1 s	6.393	10.101
T=0.3 s	6.393	10.101
T=0.5 s	5.812	7.576
T=1 s	5.812	5.051
T=2 s	5.086	0
	5.812	5.51

Tabella 21: scenari sismici ottenuti dalla disaggregazione;

3. preselezione in base all'intervallo di periodi considerati

La scelta dell'intervallo di periodi da considerare per la valutazione della spettrocompatibilità influenza la formazione dei gruppi di registrazioni.

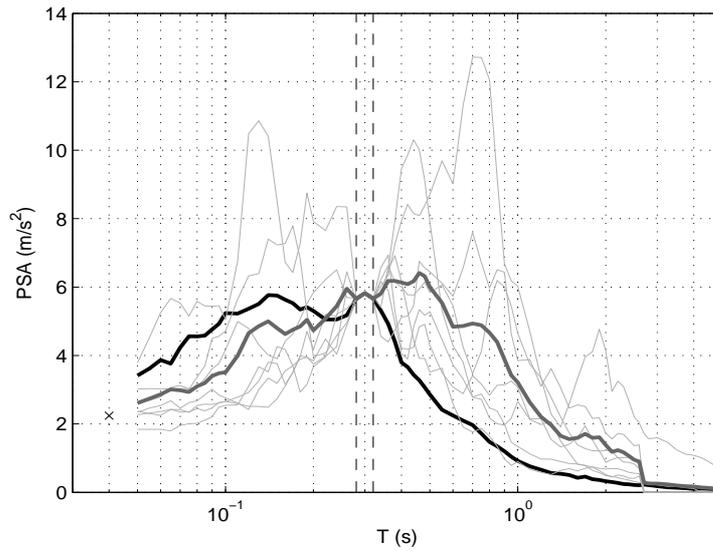


Figura 96: esempio di compatibilità tra spettro medio (linea spessa grigia) e spettro isoprobabile (linea spessa nera) per $T=[0.28s,0.32s]$

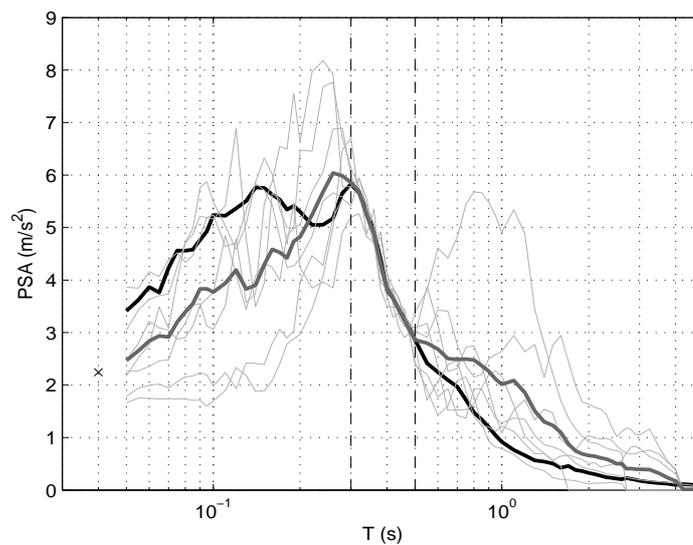


Figura 97: esempio di compatibilità tra spettro medio (linea spessa grigia) e spettro isoprobabile (linea spessa nera) per $T=[0.3s,0.5s]$

Per questo motivo è stata fatta variare l'ampiezza di tale range e contemporaneamente anche la sua posizione rispetto a quello fondamentale della struttura: per ogni coppia di ampiezza e posizione è stata ripetuta l'analisi ed è stato quindi graficato Δ in funzione di questi due parametri.

Si ricorda che Δ associato all'i-esimo periodo e al j-esimo fattore di struttura è stato calcolato come segue:

$$\Delta_{ij} = \frac{\delta_{ij} - \delta_{ij,rif}}{\delta_{ij,rif}}$$

Le ampiezze considerate variano da un valore minimo pari a $0.5 \cdot T_{fondamentale}$ ad un valore pari a $2.5 \cdot T_{fondamentale}$ con incrementi di $0.1 \cdot T_{fondamentale}$.

La posizione è indicata da un parametro che assume i seguenti valori: 0, 0.25, 0.3, 0.5, 0.6, 0.75, 0.85 e 1: se posizione=1 l'intervallo di periodi ha come estremo inferiore il valore $T_{fondamentale}$ e quindi il 100% dell'intervallo è formato da periodi almeno pari a $T_{fondamentale}$, se posizione=0 l'intervallo di periodi ha come estremo superiore il valore $T_{fondamentale}$ e nessun periodo considerato è maggiore di quello di riferimento, mentre se posizione=0.5 intervallo è centrato rispetto a $T_{fondamentale}$.

Sono riportati a titolo d'esempio i grafici riferiti a $T=0.1s$:

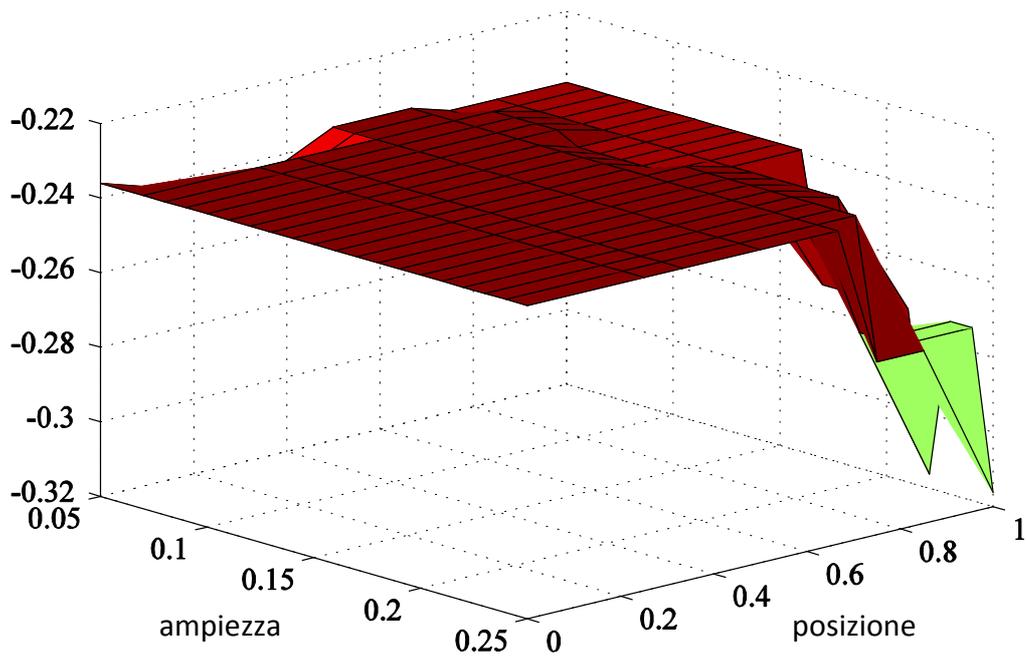


Figura 98: Δ associati a varie combinazioni di ampiezza e posizione degli intervalli di T (q=1 e T=0.1s)

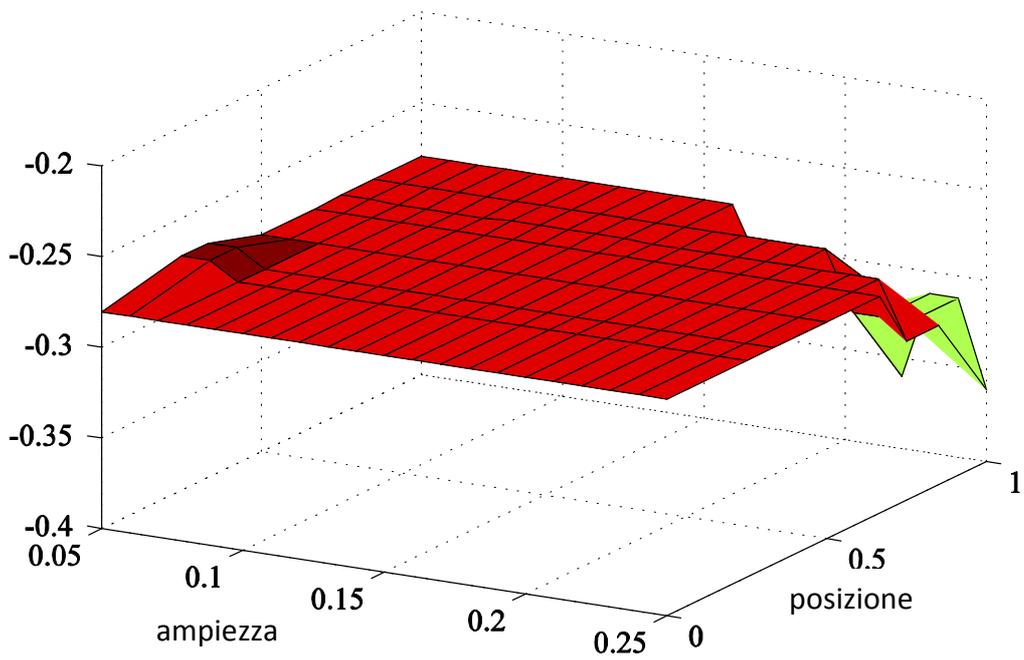


Figura 99: Δ associati a varie combinazioni di ampiezza e posizione degli intervalli di T (q=2 e T=0.1s)

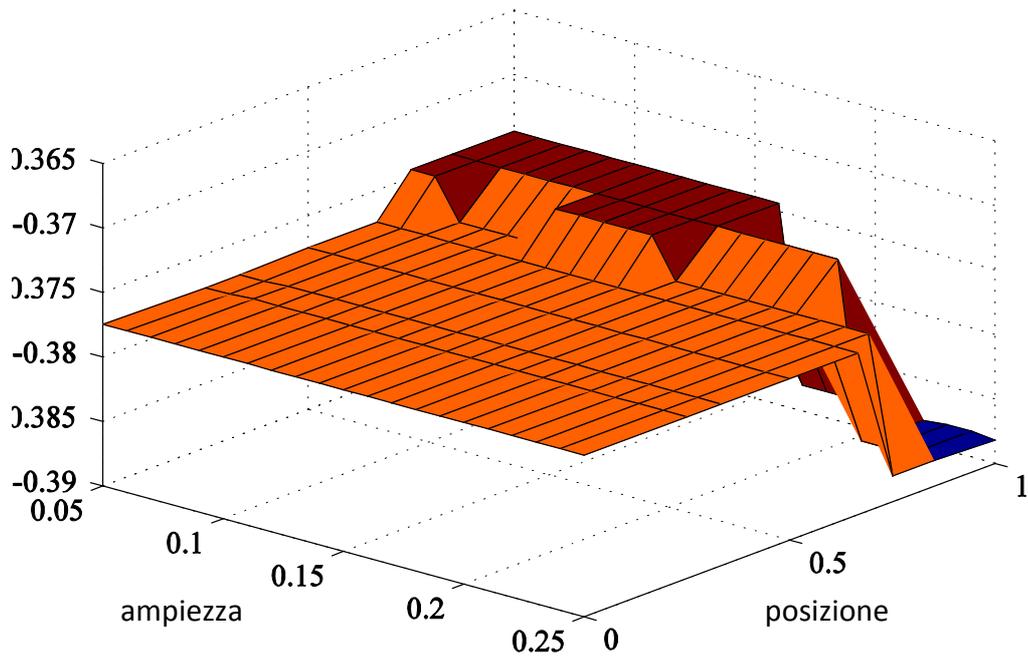


Figura 100: Δ associati a varie combinazioni di ampiezza e posizione degli intervalli di T ($q=3$ e $T=0.1s$)

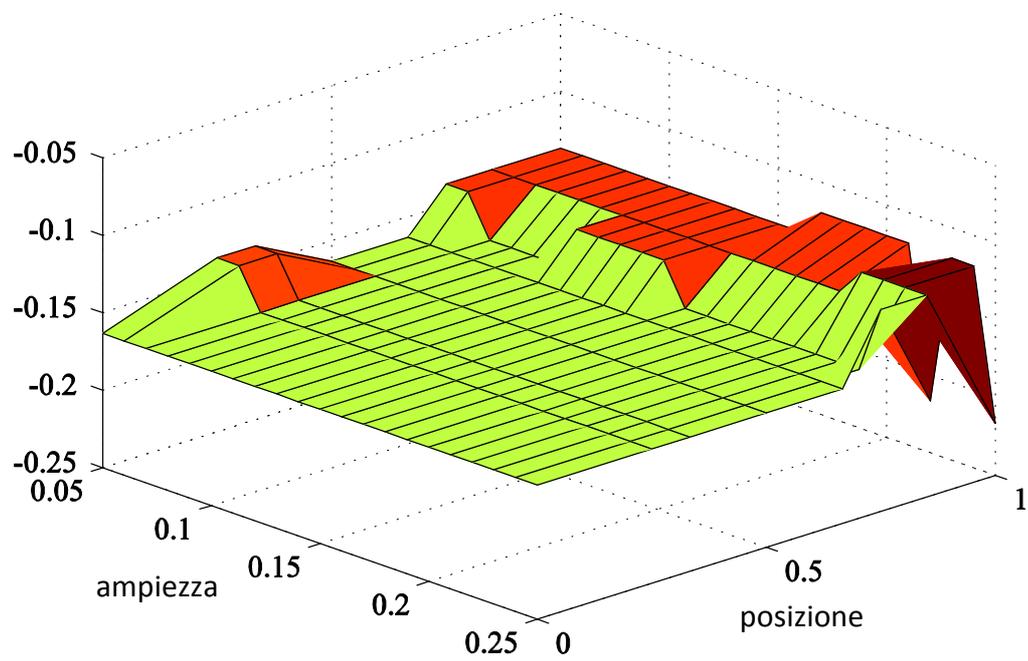


Figura 101: Δ associati a varie combinazioni di ampiezza e posizione degli intervalli di T ($q=4$ e $T=0.1s$)

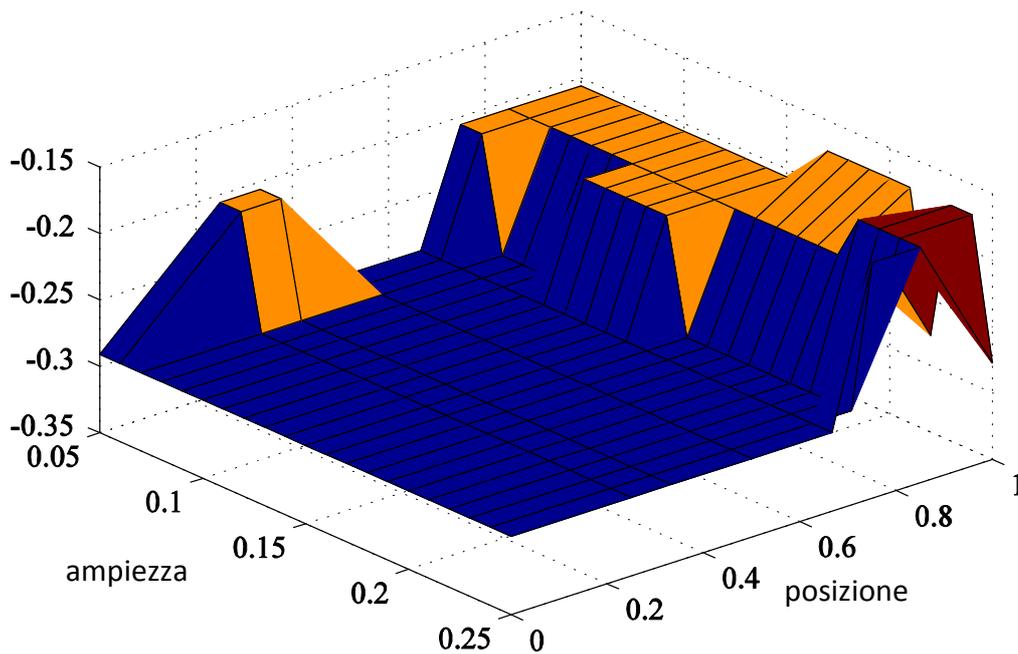


Figura 102: Δ associati a varie combinazioni di ampiezza e posizione degli intervalli di T ($q=5$ e $T=0.1s$)

Si nota che le migliori previsioni degli spostamenti si ottengono per intervalli di periodi stretti e spostati verso $T > T_{\text{fondamentale}}$. Restringere il campo nel quale è calcolata la compatibilità permette infatti di ottenere accelerogrammi che in corrispondenza del periodo dell'oscillatore sono più aderenti allo spettro isoprobabile. In più le strutture analizzate, essendo soggette a deformazioni plastiche, manifestano una diminuzione della loro rigidità rispetto a quelle elastiche e questo si traduce in un aumento del loro periodo proprio di vibrazione.

4. preselezione in termini di una combinazione di distanza e magnitudo:

Questa analisi è stata condotta operando contemporaneamente una preselezione in termini di magnitudo e distanza. In questo caso, a differenza delle analisi descritte in precedenza, sono stati fatti variare anche i valori minimi degli intervalli di M e R. Traslando il range di M e R ammissibili è stato quindi possibile ottenere gruppi formati da registrazioni sempre diverse.

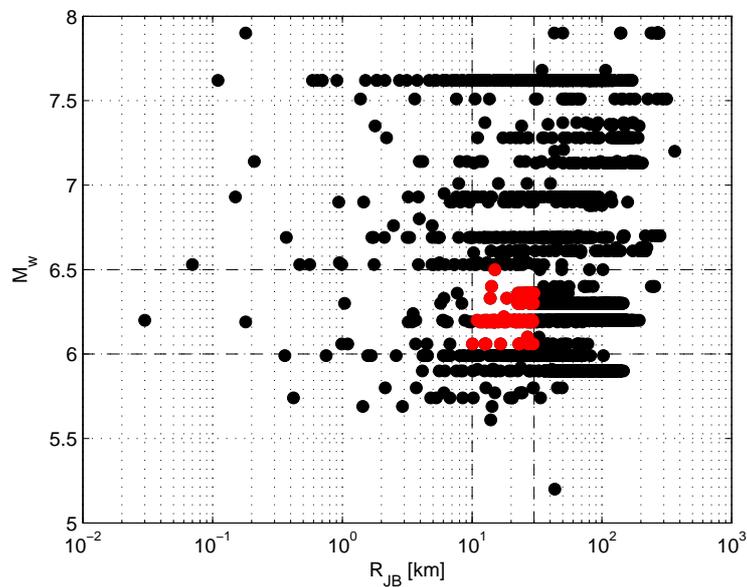


Figura 103: esempio di preselezione delle registrazioni in termini di magnitudo e distanza

Un'altra differenza rispetto al caso precedente è riscontrabile nella scelta del parametro usato per quantificare la distanza tra gli spettri: al δ_{assoluto} si è preferito il δ_{relativo} . E' stata aggiunta una restrizione sul valore di δ_{relativo} : se al gruppo analizzato corrispondeva un $\delta_{\text{relativo}} > 0.2$ questo veniva scartato, concludendo che per la coppia di magnitudo e distanza considerata non è stato trovato alcun gruppo ritenuto compatibile (questa situazione è rappresentata nei grafici con i quadratini di colore blu).

L'intervallo dei periodi per il quale è verificata la spettrocompatibilità è stato scelto più stretto possibile, per $T_{\text{fondamentale}}=0.5s$ si è assunto $T=[0.48s, 0.55s]$.

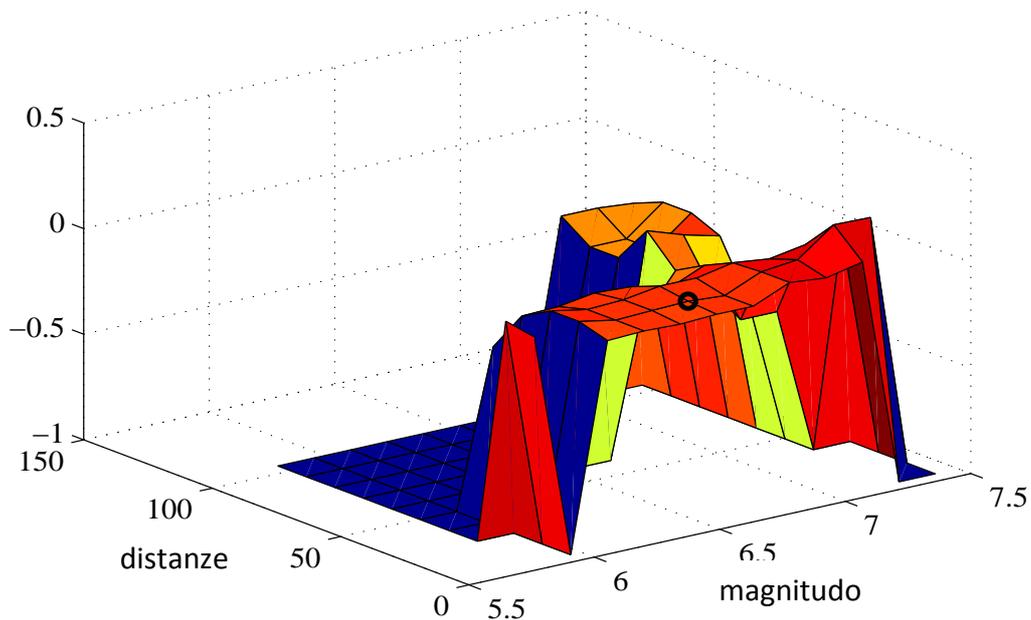


Figura 104: Δ associati a varie combinazioni di intervalli di magnitudo e distanza ammissibili ($T=0.5s$, $q=1$)

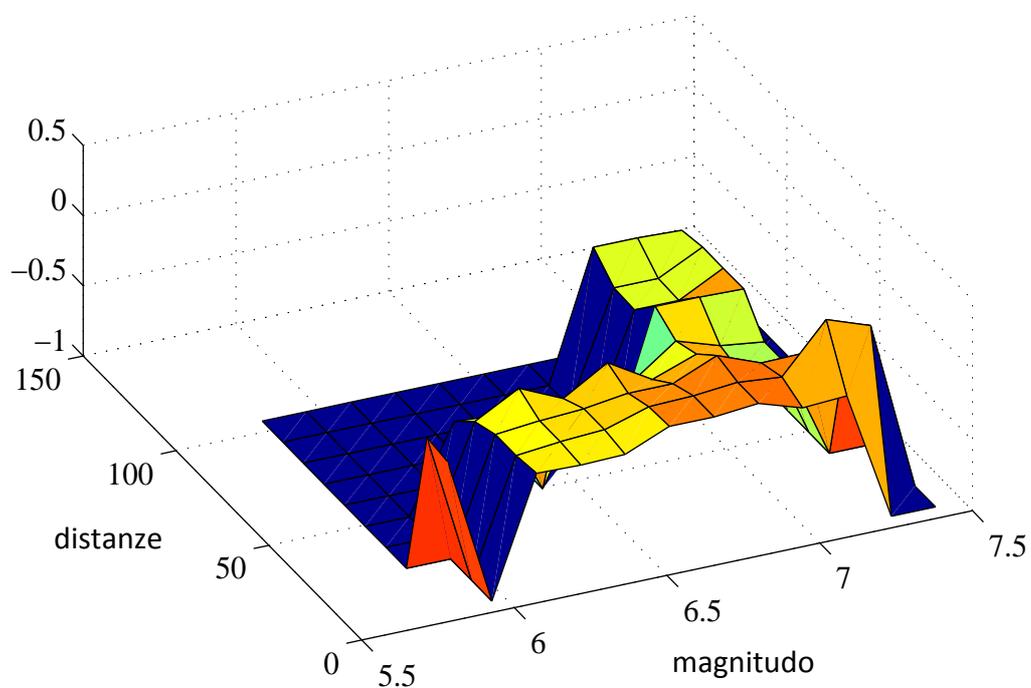


Figura 105: Δ associati a varie combinazioni di intervalli di magnitudo e distanza ammissibili ($T=0.5s$, $q=2$)

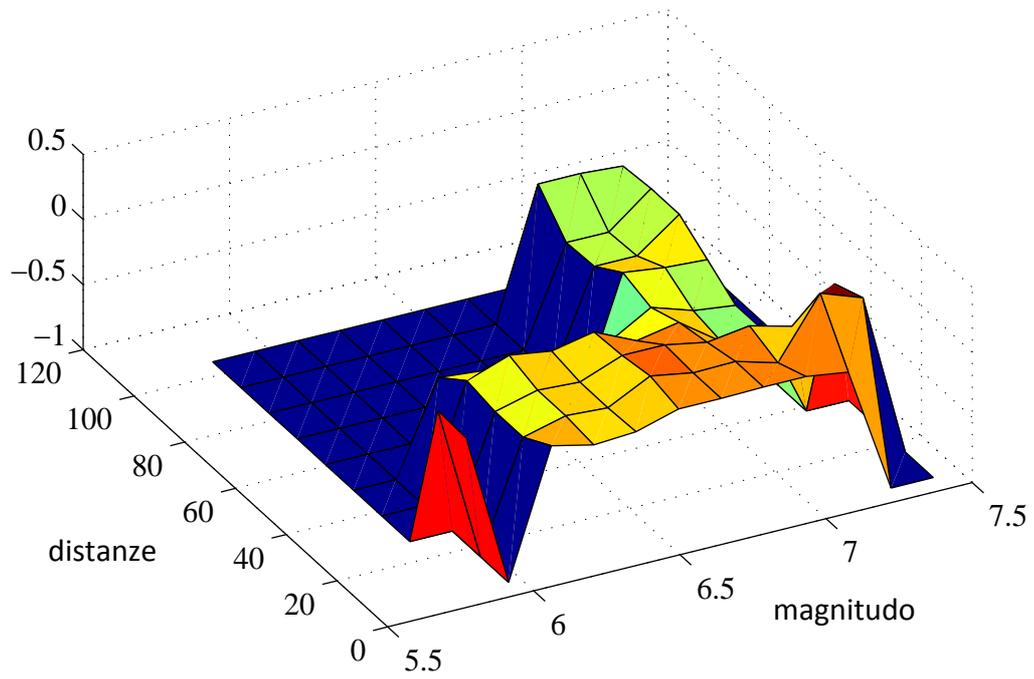


Figura 106: Δ associati a varie combinazioni di intervalli di magnitudo e distanza ammissibili ($T=0.5s$, $q=3$)

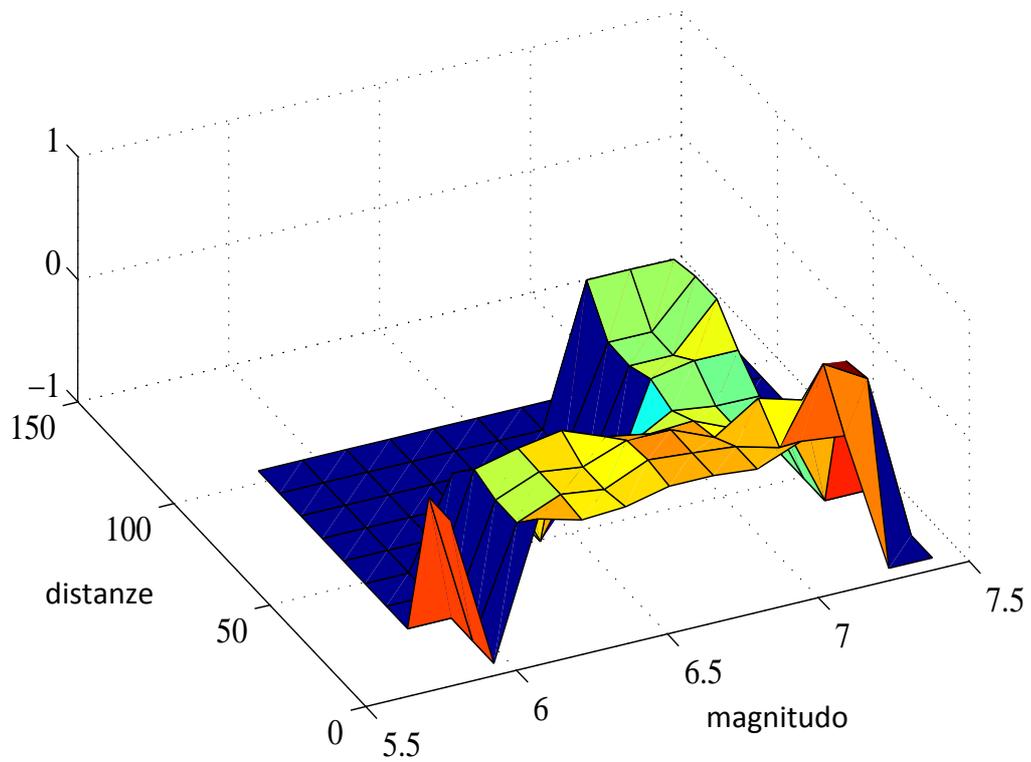


Figura 107: Δ associati a varie combinazioni di intervalli di magnitudo e distanza ammissibili ($T=0.5s$, $q=4$)

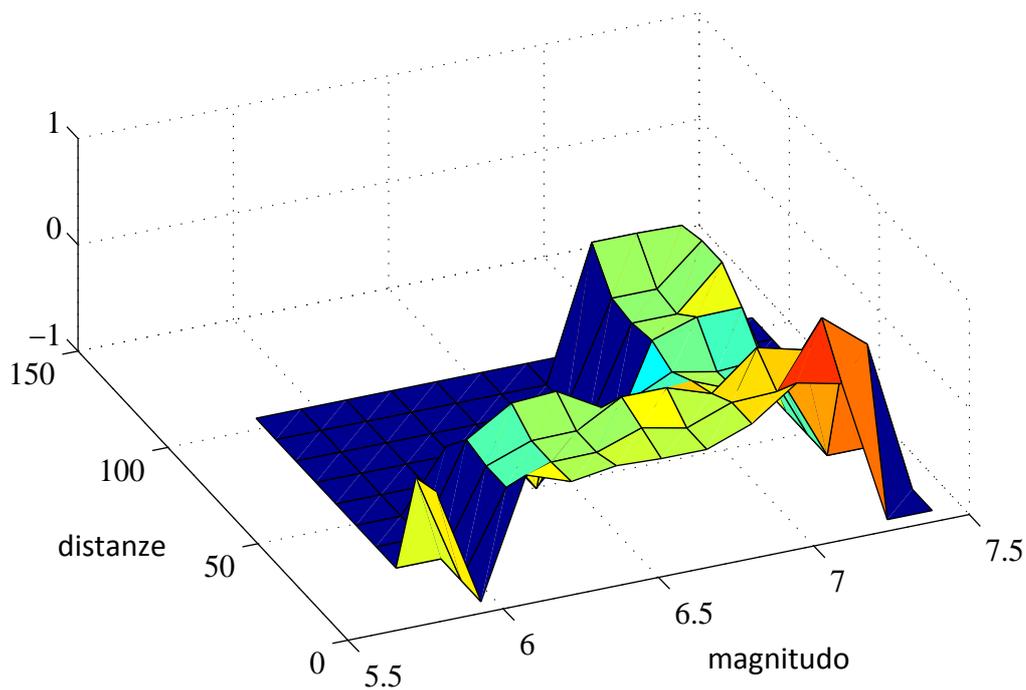
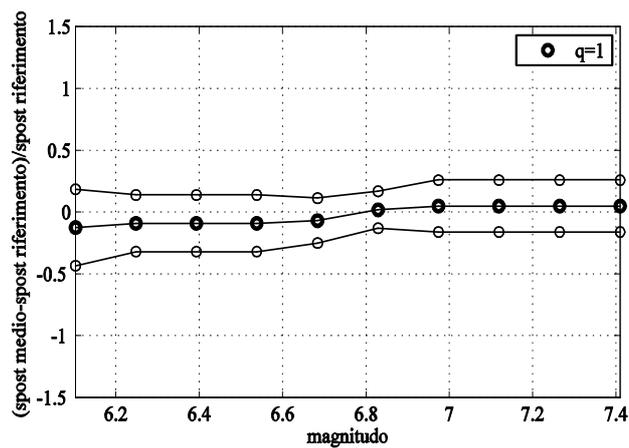


Figura 108: Δ associati a varie combinazioni di intervalli di magnitudo e distanza ammissibili ($T=0.5s$, $q=5$)

Per interpretare questi grafici si fa riferimento ai risultati delle analisi descritte nel paragrafo 6.2 (se ne riporta di seguito un esempio per maggiore chiarezza espositiva).



0 < M < 7							
n° accelerogramma	1306	72	3055	4687	4569	3765	5431
magnitudo	6.53	6.69	6.9	6.06	6.19	6.2	6.69
distanza J-B	13.52	33.56	22.54	22.96	23.23	32.21	19.1

0 < M < 6.7							
n° accelerogramma	4919	36	4862	4687	4569	1975	2508
magnitudo	5.99	6.69	5.99	6.06	6.19	5.69	6.2
distanza J-B	28.37	58.32	15.34	22.96	23.23	1.44	18.47

Tabella 22: confronto tra accelerogrammi individuati con preselezione rispetto a intervalli diversi di M (T=0.5, q=1)

Come già sottolineato, il grafico mostra che se il gruppo mediamente più spettrocompatibile è individuato a partire dalle registrazioni con magnitudo comprese tra 0 e 7, questo genera sugli oscillatori risposte in termini di spostamento più simili a quelle richieste rispetto al caso di accelerogrammi preselezionati per un range di magnitudo da 0 a 6.7.

Questa differenza è dovuta al fatto che l'accelerogramma 3055, il cui spettro risulta molto vicino a quello isoprobabile, è ammissibile nel primo caso mentre deve essere scartato nel secondo. In conseguenza di ciò anche altri accelerogrammi individuati nei due casi differiscono. Questo è dovuto al fatto che è la media delle registrazioni a dover risultare compatibile piuttosto che i singoli accelerogrammi.

Nelle tabelle 21 sono riportati gli accelerogrammi appartenenti ai due gruppi. Come si può vedere, essi comprendono anche registrazioni alle quali è associata una magnitudo relativamente bassa e simile al valore fornito dalla disaggregazione (5.812).

Lo spostamento medio indotto sull'oscillatore caratterizzato da $q=1$ dal gruppo ottenuto dalle registrazioni associate a M comprese tra 0 e 7 è molto vicino a quello di riferimento, il parametro Δ risulta infatti uguale a -0.0066.

Nel tipo di analisi oggetto di questo paragrafo, invece, sono stati considerati ammissibili gli accelerogrammi con magnitudo appartenente ad un range di ampiezza 0.4 e il valore medio di questo intervallo è stato fatto variare tra 5.81 e 7.41. Contemporaneamente è stata operata una preselezione sulle

distanze: di volta in volta sono stati considerati solo gli accelerogrammi ai quali è associata una distanza di Joyner-Boore compresa nell'intervallo $R_{JB} \pm 20\text{km}$ dove R_{JB} ha assunto 10 valori compresi tra 5 e 105km.

Nella tabella sottostante sono riportati i Δ calcolati per tutte le combinazioni di intervalli di magnitudo e distanze (per ognuno dei quali è riportato il valore medio). La rappresentazione grafica di questa matrice è stata riportata nella figura 103.

	5.81	5.96	6.1	6.25	6.39	6.54	6.68	6.83	6.97	7.12	7.27	7.41
5	0.0684	-1	-0.025	-0.018	-0.024	-0.016	-0.016	0.0583	0.0423	0.0791	-1	-1
16.1	0.0928	-1	0.014	-0.018	-0.01	-0.004	-0.016	0.0583	0.077	0.2044	0.2005	-1
25.2	-1	-1	0.014	-0.018	-0.01	0.0164	0.0164	0.0498	0.0301	0.0592	0.0659	-1
38.3	-1	-1	-0.062	-0.055	-0.029	-0.037	-0.088	-0.013	-0.308	-0.308	-1	-1
49.4	-1	-1	-0.257	-0.313	-1	-0.308	-0.308	-0.088	-0.218	-0.308	-1	-1
60.5	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.0493	-0.009	-0.051	-1	-1
71.6	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-0.129	-0.129	0.0061	-1	-1
82.7	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-0.129	-0.129	0.0061	-1	-1
93.8	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-0.034	-0.034	-0.05	-1	-1
105	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Tabella 23: Δ ottenuti tramite la preselezione delle registrazioni in termini di M e R_{JB} ($T=0.5s$, $q=1$)

Per le coppie M- R_{JB} per le quali non è stato trovato alcun gruppo mediamente compatibile ($\delta_{\text{relativo}} > 0.2$) Δ è stato posto uguale a -1.

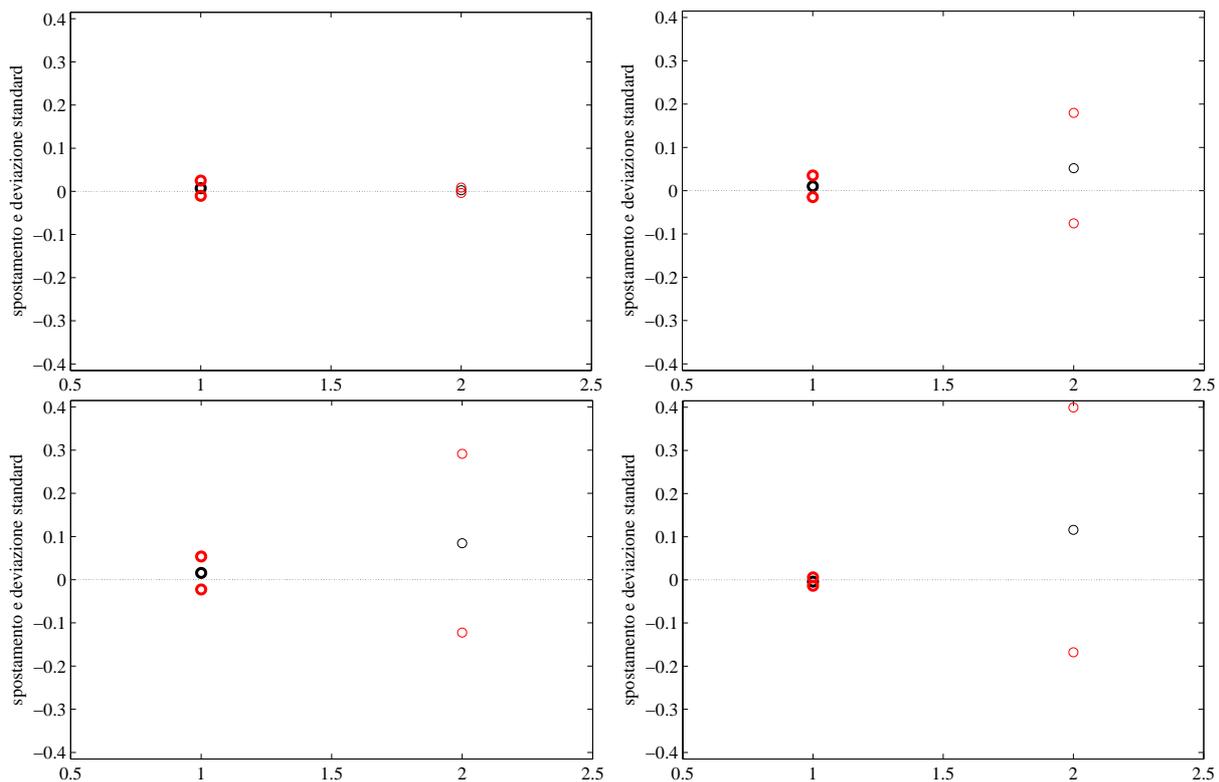
Come si può vedere dalla tabella, i valori assoluti dei Δ risultano significativamente più grandi rispetto al caso richiamato prima ($\Delta=-0.0066$).

Si può concludere pertanto che per poter prevedere nel modo più accurato possibile la risposta della struttura è necessario tenere conto di quegli accelerogrammi associati a magnitudo simili a quella data dalla disaggregazione. Se queste registrazioni vengono scartate la differenza tra lo spostamento misurato e quello atteso aumenta e il suo valore non sembra essere particolarmente influenzato dall'intervallo di magnitudo scelto.

5. eliminazione delle registrazioni che singolarmente sono più vicine allo spettro

Sono stati calcolati, per ogni fattore di struttura, gli spostamenti medi e le deviazioni standard del gruppo mediamente più spettrocompatibile ottenuto operando una preselezione in termini di magnitudo e distanza nell'intorno dei valori dello scenario sismico individuato tramite la disaggregazione ed l'intervallo di periodi più stretto possibile intorno a quello fondamentale. Questi sono stati confrontati con i corrispondenti valori ottenuti utilizzando gli stessi criteri di preselezione ma avendo cura di formare i gruppi escludendo i 25 accelerogrammi che singolarmente approssimano meglio lo spettro isoprobabile.

Da questo confronto si è notato che preselezionare le registrazioni per la formazione dei gruppi in base alla loro compatibilità con lo spettro non produce miglioramenti significativi in termini di spostamenti medi e dispersioni dei risultati.



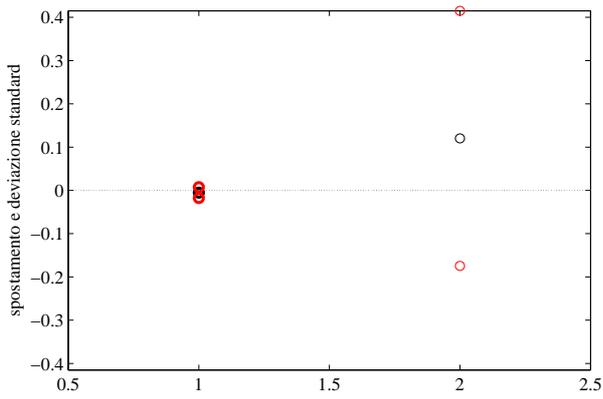


Figura 109: confronto tra lo spostamento e la deviazione standard del gruppo formato a partire dai 25 accelerogrammi più spettrocompatibili (puntini spessi) e quello formato scartando tali accelerogrammi (puntini sottili) per $T=0.3s$ e q da 1 a 5.

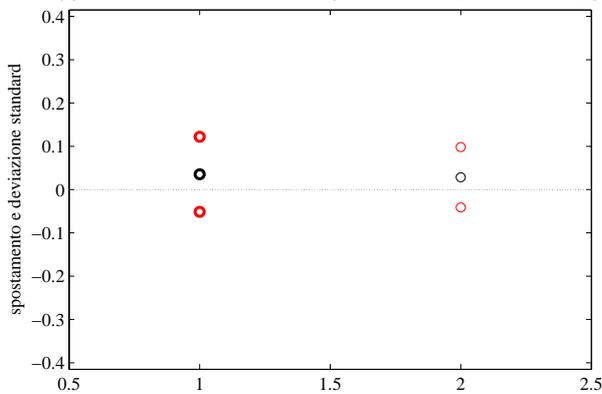
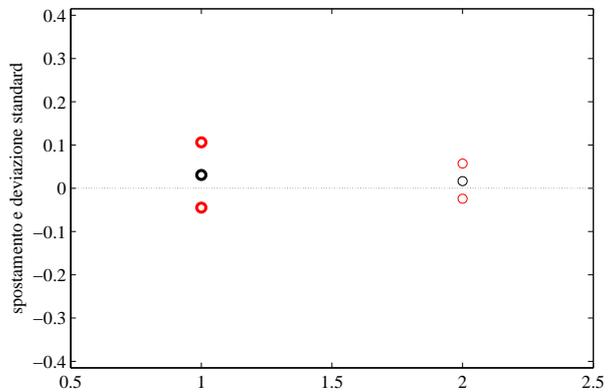
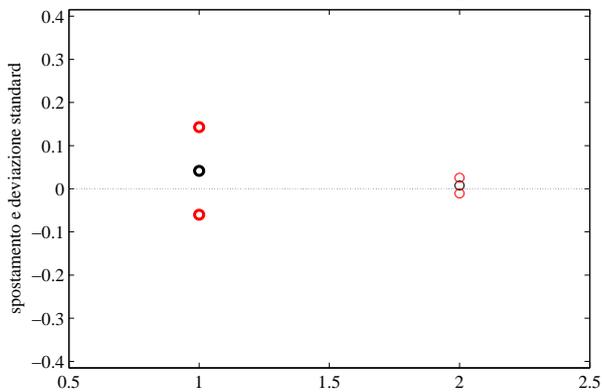
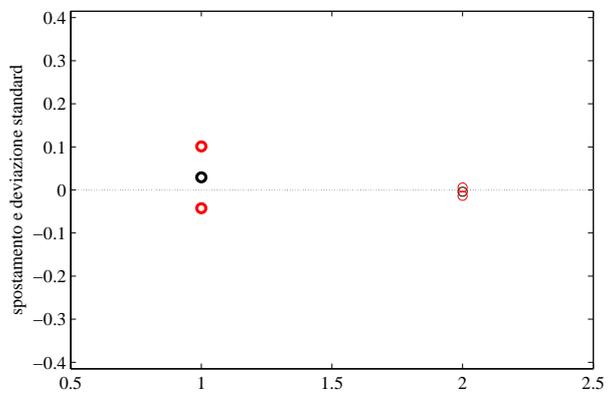
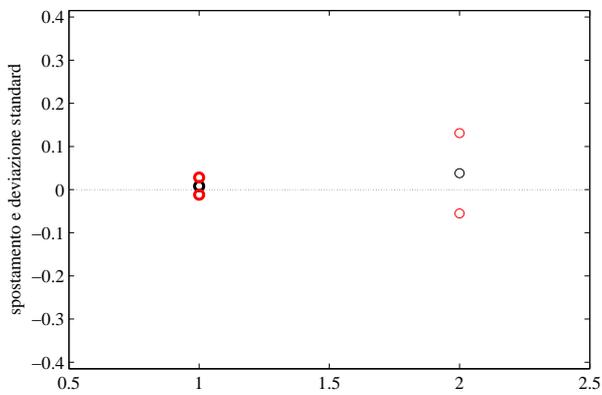


Figura 110: confronto tra lo spostamento e la deviazione standard del gruppo formato a partire dai 25 accelerogrammi più spettrocompatibili (puntini spessi) e quello formato scartando tali accelerogrammi (puntini sottili) per $T=0.5s$ e q da 1 a 5.

6. scalatura degli accelerogrammi

L'ultima possibilità indagata è quella di utilizzare la tecnica dello scaling lineare degli accelerogrammi: questo metodo consiste nel moltiplicare le ordinate dello spettro di ogni registrazione per un coefficiente calibrato in modo da rendere tale spettro il più aderente possibile a quello isoprobabile nell'intervallo di periodi considerato.

Ad ogni accelerogramma è stato associato un fattore di scala ottimale, cioè quello che minimizza la distanza relativa tra lo spettro scalato e quello di riferimento. Perturbando infatti questo valore si è assistito ad un modesto peggioramento nella previsione dello spostamento medio ma anche ad un più rilevante aumento della dispersione degli spostamenti intorno a tale valore.

Questa tendenza è mostrata nel grafico sottostante: i punti spessi rappresentano la media (in colore nero) e la deviazione standard (in colore rosso) degli spostamenti ottenuti dagli accelerogrammi scalati tramite il fattore di scala ottimale, i punti sottili rappresentano le stesse grandezze ottenute dopo aver modificato tali fattori.

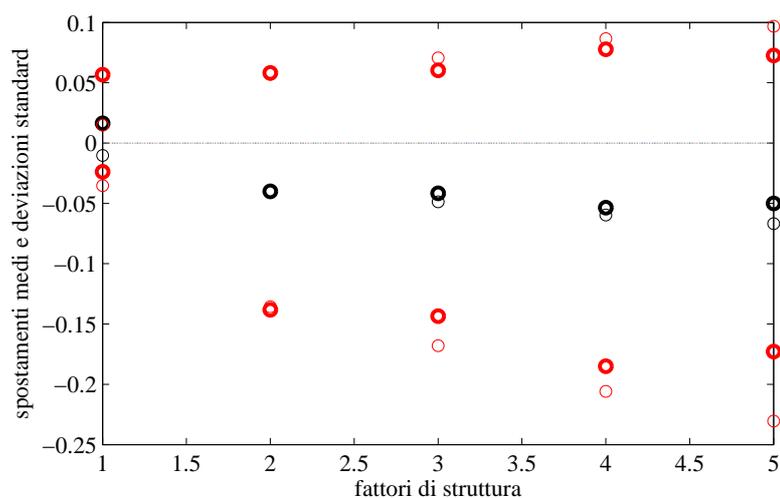


Figura 111: confronto tra media e deviazione standard degli spostamenti ottenuti considerando fattori di scala ottimali e perturbati

Dopo aver scalato singolarmente ogni accelerogramma, sono stati selezionati dal database solo quelli per i quali il fattore di scala risultava minore o uguale a 5. Successivamente queste registrazioni sono state usate per effettuare l'analisi descritta nel paragrafo 5.4, operando cioè un'ulteriore selezione in termini di magnitudo e distanza. La compatibilità è stata richiesta per un intervallo di periodi stretto, cioè per T compresi tra 0.48s e 0.55s.

Come evidenziato dal grafico in figura 112, questa tecnica presenta il vantaggio di aumentare molto il numero di accelerogrammi spettrocompatibili e permette quindi di ottenere una scelta molto più vasta di gruppi da analizzare. A riprova di quanto appena esposto si è osservato che sottoponendo gli accelerogrammi a scalatura non si è più verificata la condizione $\delta_{\text{relativo}} > 0.2$: per ogni combinazione di range di magnitudo e distanza è stato quindi trovato almeno un gruppo compatibile.

	5.81	5.96	6.1	6.25	6.39	6.54	6.68	6.83	6.97	7.12	7.27	7.41
5	0.049	1.2573	0.5941	0.0271	0.1511	0.047	0.0554	0.0121	0.3136	0.6038	0.148	0.0445
16.1	0.7811	-0.006	0.252	0.4539	0.4541	2.0622	0.1062	1.5218	1.0533	1.9263	0.6566	0.0438
25.2	1.2323	0.7786	-0.235	0.3771	0.5777	-0.074	-0.05	-0.11	2.3886	1.5847	1.5574	0.0423
38.3	2.0152	1.7166	1.3508	2.4739	1.5755	0.3741	0.3526	0.6623	1.7765	0.2044	1.1506	0.7251
49.4	1.0048	0.9887	2.8635	2.7487	3.5079	-0.011	0.2284	0.4602	0.337	0.2211	-0.154	0.9222
60.5	1.617	1.1149	1.2987	1.5845	2.2759	0.2665	1.2906	0.6647	1.0371	0.0681	0.9368	1.2483
71.6	1.5912	1.3039	4.91	3.0112	3.0112	0.8904	0.8972	0.1438	0.8245	0.0125	2.6194	0.1827
82.7	2.4581	2.4924	4.2152	2.9802	3.6702	1.2189	0.8785	0.0331	-0.239	0.1776	0.1225	0.0451
93.8	1.7058	1.7058	3.29	3.9003	3.0293	0.2061	0.097	-0.128	2.0123	0.4908	0.1981	0.9045
105	1.9873	1.9873	2.796	2.5033	1.9797	0.2533	0.2296	0.2935	2.166	0.4391	0.9574	0.0469

Tabella 24: Δ ottenuti tramite preselezione in termini di M e R_B delle registrazioni scalate (T=0.5s, q=1 e T=[0.48, 0.55])

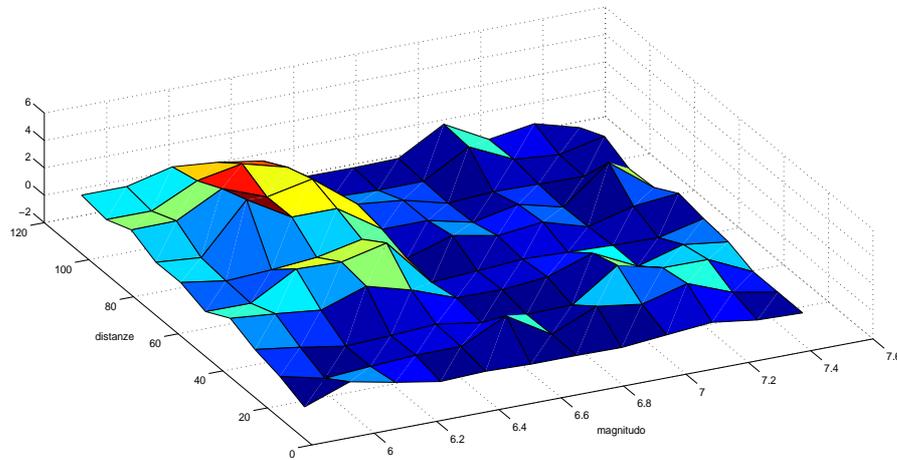


Figura 112: rappresentazione grafica dei Δ ottenuti tramite preselezione in termini di M e R_B delle registrazioni scalate ($T=0.5s$, $q=1$ e $T=[0.48, 0.55]$)

Infine la stessa analisi è stata ripetuta aumentando l'intervallo di periodi T da $[0.48, 0.55]$ a $[0.48, 0.7]$. Allargare questo range ha permesso di ottenere gruppi in grado di generare sulla struttura spostamenti molto più vicini a quelli ottenuti dalla PSHA. Cercare la spettrocompatibilità su un intervallo molto ristretto, infatti, se da un lato permette di individuare registrazioni puntualmente molto vicine allo spettro, dall'altro però può rendere ammissibili accelerogrammi il cui spettro ha forma molto diverso da quello isoprobabile ma che in corrispondenza di $T_{\text{fondamentale}}$ presentano un picco o una depressione. Per intervalli di periodi più ampi, invece, si trovano in genere spettri dalla forma più simile a quella cercata.

	5.81	5.96	6.1	6.25	6.39	6.54	6.68	6.83	6.97	7.12	7.27	7.41
5	0.6222	0.7512	1.3003	0.0916	1.3082	0.0421	-0.119	-0.081	0.0394	0.0394	0.0353	0.014
16.1	-0.19	-0.376	0.2826	0.8382	0.3653	0.0401	0.128	-0.071	0.0469	0.0469	0.0356	0.019
25.2	0.3913	0.1481	1.4027	0.1432	0.5131	0.0457	0.0476	0.0482	0.17	-0.005	5.6479	1.147
38.3	1.1626	0.8475	2.1949	1.5806	0.5984	0.4372	0.1766	0.0489	-0.034	0.1719	0.3871	0.615
49.4	2.5636	1.3605	-0.177	-0.154	1.9277	0.1925	1.0678	-0.066	0.2045	-0.068	0.2424	0.051
60.5	0.705	0.705	1.9695	1.0494	1.5361	-0.017	-0.044	0.5614	0.2278	0.2872	1.2613	0.212
71.6	2.7577	2.1568	1.5032	1.4416	1.4416	0.349	1.0572	0.2124	0.1673	0.9743	1.7094	0.046
82.7	2.0028	2.733	2.7005	2.8776	6.1455	0.2457	0.3253	2.9685	2.7086	0.2626	0	1.785
93.8	1.6	1.6	2.6756	1.8617	3.821	2.3021	1.4263	2.0171	2.6392	0.1225	-0.006	1.789
105	1.36	1.36	3.0652	3.4499	1.5111	0.5228	0.3137	-0.056	0.2574	0.3402	0.0259	0.044

Tabella 25: Δ ottenuti tramite preselezione in termini di M e R_{jB} delle registrazioni scalate ($T=0.5s$, $q=1$ e $T=[0.48, 0.7]$)

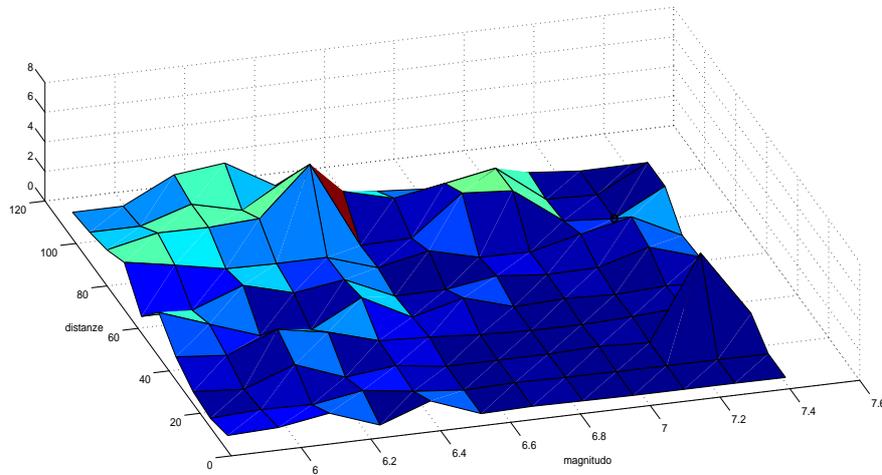


Figura 113: rappresentazione grafica dei Δ ottenuti tramite preselezione in termini di M e R_{jB} delle registrazioni scalate ($T=0.5s$, $q=1$ e $T=[0.48, 0.7]$)

6. Conclusioni

L'analisi di pericolosità sismica (o PSHA) è uno strumento utile per definire i livelli di sollecitazione indotti su una struttura dall'azione sismica attesa con una certa probabilità durante la sua vita utile.

In questa tesi l'analisi è stata effettuata avvalendosi del programma CRISIS2007. Oltre alla PSHA effettuata in modo "classico", che permette di ricavare i livelli di pseudoaccelerazione associati ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni generati su oscillatori semplici elastici, è stata effettuata anche una seconda analisi, ottimizzata per le strutture elastoplastiche, grazie alla quale sono stati ottenuti gli spostamenti massimi indotti sugli oscillatori da un evento sismico previsto con un tempo di ritorno di 475 anni.

Una volta ricavati quindi gli spettri isoprobabili in termini di pseudoaccelerazione e spostamento, questi sono stati adottati come riferimento per le elaborazioni successive: il primo è stato utilizzato per individuare gruppi di accelerogrammi spettrocompatibili, il secondo è stato indispensabile per quantificare la differenza tra la risposta strutturale generata da tali gruppi sugli oscillatori non lineari e quella attesa.

Sono state introdotte limitazioni sui valori di magnitudo e distanza associati alle registrazioni usate per la formazione dei gruppi, sugli intervalli di periodi da considerare nella verifica di compatibilità e introducendo tecniche di scaling: è stato studiato in che modo l'applicazione di questi criteri di preselezione influenzasse la formazione dei gruppi spettrocompatibili e di conseguenza lo spostamento massimo indotto sulle strutture.

7. Bibliografia

Abrahamson, N. A., and Silva, W. J. (2008a). "Abrahamson & Silva NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters." Report, Final report prepared for the Pacific Earthquake Engineering Research Center, February 2008.

Ambraseys, N. N., Simpson, K. A., and Bommer, J. J. (1996). "The prediction of horizontal response spectra in Europe." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 25, 371-400.

Ambraseys N. N., Douglas J, Sarma S. K. e Smit P. M. (2005) " Equations for the Estimation of Strong Ground Motions from Shallow Crustal Earthquakes Using Data from Europe and the Middle East: Horizontal Peak Ground Acceleration and Spectral Acceleration" *Bulletin of Earthquake Engineering* 3, 1–53

Baker, J.W. and C.A. Cornell (2006), "Spectral shape, epsilon and record selection." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(9): 1077-1095.

Bazzurro, P., and Cornell, C. A. (1994). "Seismic hazard analysis of nonlinear structures. I: Methodology." *Journal of Structural Engineering*, 120(11), 3320-3344.

Bazzurro, P., and Cornell, C. A. (1999). "Disaggregation of seismic hazard." *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(2), 501-520.

Bommer, J. J., Acevedo A. (2004). "The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis". *Journal of Earthquake Engineering*, 8(1), 43-91.

Bommer, J. J., Stafford, P. J., Alarcón, J. E., and Akkar, S. (2007). "The influence of magnitude range on empirical ground-motion prediction." *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(6), 2152-2170.

Bracciali E. (2010), "Valutazione delle proprietà di diverse misure d'intensità dello scuotimento sismico" Tesi di laurea.

Buratti, N., P.J. Stafford, and Bommer J. J., (2011) "Earthquake Accelerogram Selection and Scaling Procedures for Estimating the Distribution of Drift Response." *Journal of Structural Engineering*, 137(3) 345-357.

Chiou B. S. J. e Young R. R. (2006) "Chiou and Youngs PEER-NGA Empirical Ground Motion Model for the Average Horizontal Component of Peak Acceleration and Pseudo-Spectral Acceleration for Spectral Periods of 0.01 to 10 Seconds" Interim Report for USGS Review.

Faccioli E., Paolucci R. (2005), "Elementi di Sismologia applicata all'Ingegneria" Pitagora Editrice Bologna Iervolino, I., and Cornell, C. A. (2005). "Record selection for nonlinear seismic analysis of structures." *Earthquake Spectra*, 21(3), 685 - 713.

Katsanos, E. I., Sextos A. G., Manolis G. D. (2010). "Selection of earthquake ground motion records: A state-of-the-art review from a structural engineering perspective." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30, 157-169.

Kramer S. L. (1996), "Geotechnical Earthquake Engineering" *Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics*.

Luco, N. and P. Bazzurro, *Does amplitude scaling of ground motion records result in biased nonlinear structural drift responses?* *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2007. 36(13): p. 1813-1835.

PEER. (2005). "Next Generation of Attenuation (NGA) database. PEER strong-motion database (<http://peer.berkeley.edu/nga/index.html>)." Pacific Earthquake Engineering Research Centre, Berkeley.

Tothong, P. and Luco N. (2007) "*Probabilistic seismic demand analysis using advanced ground motion intensity measures.*" *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(13), 1837-1860.

Tothong, P., Cornell C. A., and Baker J. W. (2007) "Explicit directivity–pulse inclusion in probabilistic seismic hazard analysis." *Earthquake Spectra*, 23(4) 867-891.

Watson-Lamprey J. e Abrahamson N. (2005) "Selection of ground motion time series and limits on scaling" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 26, 477–482.

