

***POLITECNICO DI TORINO***

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica*

***TESI DI LAUREA MAGISTRALE***

***IN INGEGNERIA CIVILE***



***Stabilità dei Pendii in Zona Sismica***

*Relatore:*

*Prof. Sebastiano Foti*

*Candidata:*

*Giulia Trevisan*

*Anno accademico 2018 - 2019*

---

# INDICE

<b>INTRODUZIONE</b> .....	4
<i>I Articolazione del testo e obiettivi</i> .....	4
<b>1. STABILITA' DEI PENDII IN ZONA SISMICA</b> .....	6
1.1. <i>DEFINIZIONE DEL MODELLO GEOTECNICO E DELL'AZIONE SISMICA</i> .....	6
1.1.1. <i>Classificazione degli eventi franosi</i> .....	6
1.1.2. <i>Stabilità di un pendio in condizioni dinamiche</i> .....	8
1.1.3. <i>Inquadramento geologico e caratterizzazione del pendio</i> .....	10
1.1.4. <i>Riferimenti normativi</i> .....	13
1.2. <i>ANALISI DI STABILITÀ DEI PENDII IN CONDIZIONI SISMICHE</i> .....	18
1.2.1. <i>Introduzione</i> .....	18
1.2.2. <i>Analisi pseudostatica</i> .....	19
1.2.3. <i>Analisi dinamica semplificata</i> .....	21
1.2.4. <i>Analisi dinamica avanzata</i> .....	24
1.3. <i>VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA</i> .....	25
1.3.1. <i>Introduzione</i> .....	25
1.3.2. <i>Pericolosità sismica del sito in esame</i> .....	28
1.3.3. <i>Disaggregazione della pericolosità sismica</i> .....	33
1.3.4. <i>Determinazione delle azioni sismiche di progetto</i> .....	35
1.4. <i>ACCELEROGRAMMI E PARAMETRI DEL MOTO SISMICO</i> .....	42
1.4.1. <i>Introduzione</i> .....	42

---

1.4.2. Definizione dei parametri di scuotimento.....	43
1.4.2.1. Spettro di Fourier.....	43
1.4.2.2. Spettro di risposta.....	44
1.4.2.3. Durata.....	45
1.4.2.4. Accelerazione di picco.....	46
1.4.2.5. Velocità di picco.....	47
1.4.2.6. Spostamento di picco.....	47
1.4.3. Selezione dell'input sismico.....	48
<b>2. METODI PER LA PREVISIONE DEGLI SPOSTAMENTI.....</b>	<b>53</b>
2.1. INTRODUZIONE.....	53
2.2. METODO DI NEWMARK.....	54
2.3. CORRELAZIONI TRA PARAMETRI DEL MOTO SISMICO E SPOSTAMENTI ATTESI DEL BLOCCO DI NEWMARK.....	57
2.3.1. Spostamento blocco di Newmark – Acc.critica.....	57
2.3.2. Spostamento blocco di Newmark – Rapp. acc.critica – $pga/pgv^2$ .....	59
2.3.3. Spostamento blocco di Newmark – Rapp. acc.critica – Int.Arias.....	61
2.3.4. Spostamento blocco di Newmark – Periodo – Rapp. Acc critica.....	64
<b>3. CAPACITA' PREDITTIVA DELLE SINGOLE FORMULE .....</b>	<b>67</b>
3.1. INTRODUZIONE.....	67
3.2. SPOSTAMENTI OTTENUTI CON LE FORMULE SEMPLIFICATE.....	67
3.2.1. Riferimenti normativi e parametri considerati.....	69

---

3.2.2. Calcolo degli spostamenti con i metodi semplificati.....	69
3.3. SPOSTAMENTI OTTENUTI PER DOPPIA INTEGRAZIONE DELL'INPUT SISMICO.....	73
3.3.1. Introduzione.....	73
3.3.2. Procedura di calcolo.....	74
<b>4. ATTENDIBILITÀ DEI METODI TRATTATI.....</b>	<b>78</b>
4.1. INTRODUZIONE.....	78
4.2. ATTENDIBILITÀ DEI METODI SEMPLIFICATI.....	79
<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>84</b>
<b>APPENDICE .....</b>	<b>86</b>
APPENDICE A.....	86
A.1.....	86
A.2.....	101
APPENDICE B.....	105
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>117</b>

## INTRODUZIONE

Lo studio riguardante la stabilità dei pendii in zona sismica ha visto un crescente interesse negli ultimi decenni, soprattutto conseguentemente agli effetti disastrosi provocati dai fenomeni franosi indotti dai terremoti. Il territorio nazionale italiano è caratterizzato da una forte sismicità e da una morfologia ricca di regioni montuose, queste condizioni rendono l'Italia esposta ad un elevato rischio di eventi franosi.

La complessità dell'analisi, sia in termini di valutazione che di prevenzione, ha portato alla ricerca e formulazione di numerosi metodi di analisi e schemi semplificativi.

### **i.1. Articolazione del testo e obiettivi**

Nel presente elaborato si propone un'analisi sui metodi semplificati di calcolo degli spostamenti indotti su pendii in terra e applicati alla sismicità del territorio nazionale italiano. Lo scopo è quello di confrontare vari metodi semplificati di analisi e analizzarne la capacità predittiva e l'attendibilità.

Il primo capitolo presenta l'inquadramento del problema. Si è descritto l'effetto dell'azione sismica su un pendio naturale e le possibili conseguenze esponendo le caratteristiche principali dei metodi più noti per le analisi di stabilità. Si sono trattati inoltre i parametri di scuotimento fondamentali per lo studio del pendio in condizioni dinamiche e la scelta dell'input sismico.

Il secondo capitolo è dedicato alle caratteristiche dei diversi metodi di analisi considerati, partendo da una breve introduzione, per poi entrare ad analizzare le leggi che li caratterizzano. Nel terzo capitolo si è analizzata la capacità predittiva dei metodi di analisi, con particolare attenzione ai dati e ai parametri scelti, i modelli adottati e i software usati nelle analisi numeriche.

Il quarto capitolo vede la presentazione dei risultati di ogni analisi attraverso dati numerici e grafici, considerando la loro attendibilità.

Di fondamentale importanza è stata l'interpretazione dei dati che ha portato a specifiche considerazioni sui parametri che hanno avuto maggiore influenza nell'analisi.

Nell'ultima parte del lavoro, si sono tratte le conclusioni. Lo studio del problema di stabilità dei pendii in zona sismica con i diversi modelli di analisi presentati, anche se realistici e affidabili, deve essere fatto ponendo una particolare attenzione alla scelta dei parametri che definiscono il comportamento del terreno e del sito in analisi, dalla quale ogni metodo risulta sensibilmente condizionato.

## CAPITOLO 1

### Stabilità dei pendii in zona sismica

#### 1.1. Definizione del modello geotecnico e dell'azione sismica

##### 1.1.1. Classificazione degli eventi franosi

Con il termine frana si intende il rapido spostamento di una massa di terra o di roccia il cui centro di gravità si muove verso il basso o l'esterno.

Gli eventi franosi possono essere influenzati da vari fattori:

- *Morfologici*, come la pendenza dei versanti;
- *Geologici*, ovvero alternanza fra litotipi e caratteristiche strutturali;
- *Idrologici*, quando è presente circolazione idrica superficiale o sotterranea;
- *Antropici*, quando c'è l'intervento dell'uomo come disboscamenti, scavi;
- *Climatici* e alternanza di stagioni piovose e secche.

Le cause scatenanti si distinguono in cause strutturali o predisponenti (relative ai primi tre fattori) e in cause occasionali o determinanti (relative agli ultimi due fattori e ad eventi vulcanici e sismici).

I fenomeni sismici, a causa della loro natura ciclica e dinamica, hanno spesso il conseguente innesco di frane, le cui conseguenze dipenderanno dalle diverse condizioni geologiche e morfologiche. Per l'innesco e l'evoluzione di un evento franoso è fondamentale il legame tra resistenza al taglio e deformazione ovvero la curva tensioni – deformazioni del terreno e la resistenza al taglio di picco e residua.

Nel caso di condizioni dinamiche, differentemente da quelle statiche, le forze d'inerzia, proporzionali all'accelerazione sismica, portano ad un aumento delle forze (azioni) destabilizzanti con conseguente riduzione di quelle resistenti. Queste azioni sono variabili in intensità, verso e direzione. La causa principale del decadimento della resistenza è dovuta alla natura ciclica dei carichi e quindi a fenomeni di fatica con conseguente accumulo

delle pressioni interstiziali, la perdita di resistenza cresce al crescere del numero dei cicli legati alla durata dello scuotimento.

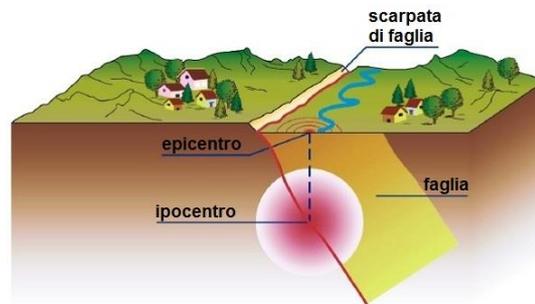


Fig 1.1. Rappresentazione di una generica area interessata ad un fenomeno sismico

Il più noto sistema di classificazione delle frane è quello di *Cruden & Varnes (1978)* che distingue sei classi fondamentali e le tipologie di movimento più frequenti.

Nel 1984 *Keefer e Wilson* ripresero il sistema di classificazione di *Varnes* applicandolo alle frane indotte da sisma, sulla base di uno studio di 40 eventi storici, da un database di oltre 300 eventi sismici, avvenuti tra gli anni '50 e '70 negli Stati Uniti.

Si identificarono tre categorie principali, la prima è costituita dai crolli e ribaltamenti, scivolamenti e valanghe di roccia. La seconda da scorrimenti traslazionali e rotazionali e scivolamenti meno veloci di quelli della prima categoria e per ultimo le colate rapide, le frane subacquee e le espansioni laterali.

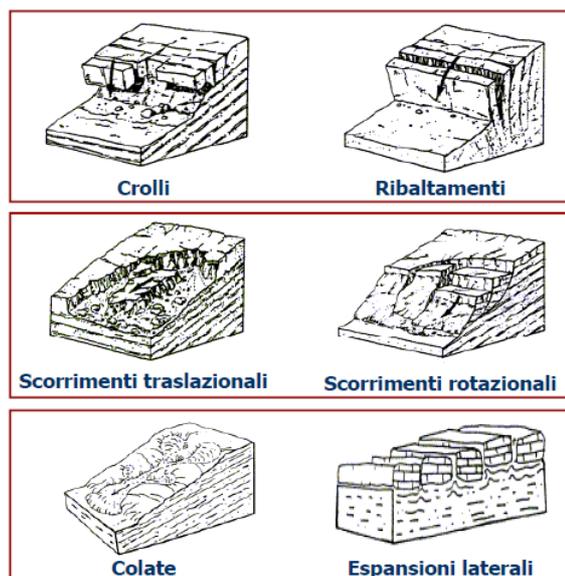


Fig 1.2. Classificazione di Varnes

Le conseguenze sul terreno del pendio, dovute all'evento sismico, dipendono dall'entità dell'evento e dalle caratteristiche geomorfologiche della superficie considerata (*Kramer 1996*). Nello studio di caratterizzazione delle frane, Keefer, dimostrò come magnitudo e inclinazione del pendio influissero sul comportamento del pendio e che dalla magnitudo dipendono anche la distanza dall'epicentro a cui possono avvenire frane e la dimensione dell'area interessata da tali eventi. Le conclusioni a cui arrivò Keefer sono riconducibili alla variabilità del comportamento del pendio in condizioni dinamiche, che dipende dalla natura del terreno e dalle condizioni geomorfologiche.

### **1.1.2. Stabilità di un pendio in condizioni dinamiche**

Come si è accennato precedentemente, il decadimento della resistenza in condizioni dinamiche è dovuto alle sollecitazioni cicliche tipiche degli eventi sismici.

Il fenomeno è noto con il nome di degradazione ciclica, dove, a causa del decadimento della rigidità, le deformazioni a taglio aumentano in modo irreversibile.

Giocano un ruolo fondamentale le condizioni iniziali in cui si trova il terreno come il livello tensionale iniziale ed il grado di saturazione. Infatti le conseguenze del fenomeno dipendono dal tipo di terreno e si possono rivelare critiche anche dove non avviene una vera e propria frana.

I fenomeni più frequenti sono:

- Scorrimenti/scivolamenti (terreni argillosi)
- Condizione critica dovuta alla diminuzione dei parametri di resistenza a taglio dei terreni;
- Fenomeni deformativi legati alla dissipazione delle sovrappressioni neutre
- Deformazioni irreversibili
- Liquefazione (prevalentemente terreni sabbiosi)

Nelle *figure 1.3, 1.4, 1.5* si riportano degli esempi di frane per liquefazione, scivolamento e colata.



*Fig 1.3. Esempio di frana e liquefazione del terreno successive all'evento sismico nell'isola di Hokkaido in Giappone (magnitudo 6.7 - settembre 2018)*



*Fig 1.4. Esempio di frana di scivolamento (Gressoney - 2001)*



*Fig 1.5. Esempio di frana per colata (Lavina di Roncovetro - 2012)*

### 1.1.3. Inquadramento geologico e caratterizzazione del pendio

Data la complessità dell'analisi di un pendio in ogni suo aspetto, è necessario un completo e dettagliato inquadramento geologico al fine di una sua corretta modellazione.

Le *linee guida AGI* danno indicazioni riguardo l'inquadramento del problema e, nello specifico, di definire, in relazione al caso che si vuole analizzare, i seguenti parametri:

- le proprietà fisiche dei terreni e dei parametri che ne descrivono il comportamento meccanico, in condizioni statiche, cicliche e dinamiche;
- le caratteristiche morfologiche e geologiche (con relativo studio della stratigrafia e delle discontinuità).
- Il regime delle pressioni interstiziali;

La fase preliminare consiste nell'inquadramento dell'area in esame tramite foto aeree e rilievi in campo, geomorfologici e topografici. In *fig 1.6* si può vedere un esempio di monitoraggio tramite Radar da satellite (*Geoportale Nazionale*) che porta ad una completa visualizzazione dell'area interessata dalla generica frana.

Successivamente a questa fase e con i dati ottenuti si può proseguire alla seconda che consiste nella programmazione di:

- rilievi per caratterizzare l'andamento della superficie topografica e classificare i litotipi;
- indagini geotecniche in sito e di laboratorio tese per definire la stratigrafia;
- tecniche di monitoraggio delle pressioni interstiziali e degli spostamenti.

Ad avere un ruolo fondamentale per la caratterizzazione di un pendio sono le indagini geotecniche in sito e la definizione accurata delle condizioni idro-geologiche e stratigrafiche dell'area in esame.

In questo caso è importante il monitoraggio dell'area interessata ovvero l'insieme delle azioni finalizzate al controllo di una grandezza variabile nel tempo e alla sua evoluzione, mediante opportuna strumentazione ed inoltre anche un'indagine, intesa come raccolta di tutte le informazioni utili per la previsione degli scenari di rischio.

In condizioni sismiche un altro aspetto di rilevante importanza è l'analisi delle pressioni interstiziali, che, come detto precedentemente, possono raggiungere valori significativi, provocando la riduzione della resistenza al taglio.

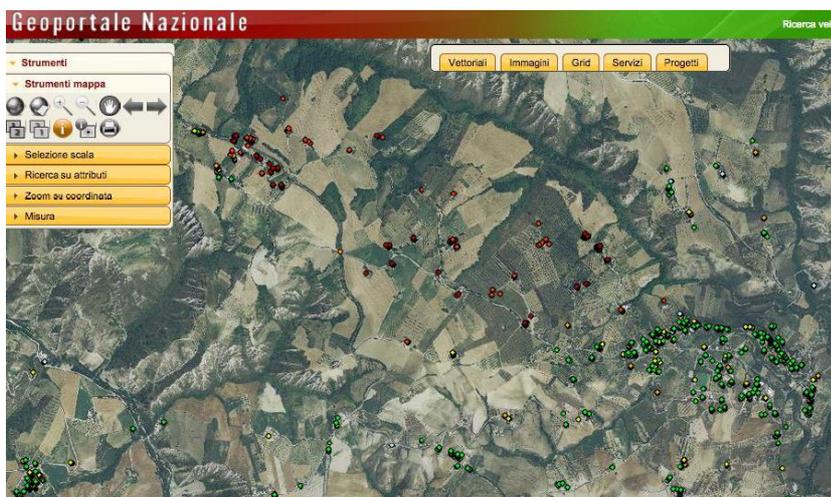
A differenza che in condizioni statiche, in questo caso, si deve definire nelle analisi di stabilità anche l'azione sismica. A seconda dei casi, si fa riferimento alla storia sismica sotto forma di accelerogramma oppure di parametri rappresentativi dell'evento sismico come per esempio accelerazione e velocità massime, intensità di Arias, potenziale sismico distruttivo, durata, magnitudo.

La valutazione e lo studio della stabilità di un pendio o di un fronte di scavo si effettua analizzando l'entità degli spostamenti indotti dal sisma, attraverso un fattore di sicurezza pseudostatico, (come specificato dall'*EC8-5*, dalla *O.P.C.M. 3274/2003*, dal *D.M. 14/01/2008*, *Eurocodici 7 e 8*). In questo modo si possono correlare le condizioni di stabilità allo stato di deformazione e averne un quadro completo. Riguardo gli spostamenti ammissibili per pendii naturali non si dispone al momento di una normativa a cui riferirsi.

I parametri da considerare e i tanti fattori riguardanti la natura del fenomeno, la gravità dei danni, la presenza o meno di infrastrutture presenti nell'area considerata rendono lo studio della stabilità dei pendii in condizioni sismiche molto complesso.

Per questi motivi lo studio può essere effettuato tramite metodi semplificati come quello proposto da Newmark nel 1965 basato sulla integrazione dell'accelerazione relativa della massa in frana, assimilata ad un corpo rigido.

Si può fare uso sennò di analisi numeriche che fanno uso di modelli costitutivi avanzati dove sono fondamentali indagini geotecniche dettagliate ed accurate.



*Fig 1.6. Inquadramento di una generica area interessata a frana tramite interferometria Radar da satellite (Geoportale nazionale)*

Nella sezione B.4 Del Decreto Ministeriale *D.M. 11.3.1988* sono specificate le principali linee guida per l'esecuzione delle indagini geotecniche e geologiche, in termini di prescrizioni generali, in fase di progetto e costruzione. In *figura 1.7* si riporta la tabella esplicativa, presa dal decreto che riassume i principali mezzi d'indagine e la loro finalità.

FINALITÀ		PRINCIPALI MEZZI DI INDAGINE
Profili geologico e geotecnico		sondaggi pozzi trincee cunicoli prospezioni geofisiche <span style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">}</span> con prelievo di campioni rimaneggiati ed indisturbati
Proprietà fisico meccaniche	Terreni a grana fine	prove di laboratorio su campioni prove; penetrometriche; prove scissometriche; prove di carico su piastra; prove speciali in sito (prove di taglio, prove pressiometriche, ecc.)
	Terreni a grana grossa	prove penetrometriche; prove di carico su piastra
	Rocce	prove di laboratorio su campioni; prove di carico su piastra; prove speciali in sito (prove di taglio prove pressiometriche, ecc.)
Rilievi sulle falde idriche	Terreni di qualsiasi tipo	piezometri; sondaggi; pozzi; trincee; cunicoli; prospezioni geofisiche
Permeabilità	Terreni a grana grossa o rocce porose molto fratturate	prove idrauliche in fori di sondaggio; prove di emungimento da pozzi
	Terreni a grana fine	prove di laboratorio su campioni indisturbati; prove piezometriche
Verifica di procedimenti tecnologici	Palificate	prove di carico su pali singoli o gruppi di pali
	Impermeabilizzazioni	prove di impermeabilità in sito e misura di quote piezometriche prima e dopo l'intervento
	Consolidamenti (terreni o rocce)	prove di laboratorio; determinazione delle proprietà meccaniche in sito eventualmente con l'ausilio di indagini geofisiche prima e dopo l'intervento

*Fig 1.7. Tabella dei principali mezzi d'indagine geotecnica come specificato nella sezione B.4 del D.M. 11.3.1988 (fonte D.M. 11.3.1988)*

#### 1.1.4. Riferimenti normativi

Le normative a cui si fa riferimento per le analisi in termini di stabilità dei pendii in zona sismica, sono principalmente: i Decreti Ministeriali *D.M. 11.3.1988*, *D.M. 16.1.1996*, *D.M. 14 gennaio 2008*; l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri *Ord. P.C.M. 20.3.2003 n. 3274* e gli *Eurocodici 7 e 8*.

Il primo decreto in materia di stabilità dei pendii fu varato nel 1996, il *D.M. 16.1.1996* riguardante le *"Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche"*, con le seguenti indicazioni della *sezione A.2*: *"Per le costruzioni su pendii le indagini devono essere convenientemente estese al di fuori dell'area edificatoria per rilevare tutti i fattori occorrenti alla valutazione delle condizioni di stabilità del complesso opera-pendio in presenza delle azioni sismiche"*.

Successivamente, nel 1988, il *Decreto Ministeriale dell'11 marzo* vara le: *"Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione."*

Il testo è composto da varie sezioni riguardanti:

- A. Disposizioni generali (prescrizioni generali, elaborati geotecnici e geologici)
- B. Indagini geotecniche (in fasi di progetto e costruzione, ampiezza e mezzi d'indagine)
- C. Opere di fondazione (criteri di progetto, prescrizioni per le indagini)
- D. Opere di sostegno
- E. Manufatti di materiale sciolto
- F. Gallerie e opere sotterranee (indagini, criteri di progetto)
- G. Stabilità dei pendii e dei fronti di scavo (verifiche di stabilità, indagini specifiche)

Nelle sezioni successive si trattano anche falde idriche, ancoraggi e discariche. In questo studio l'attenzione verrà posta nello specifico alla *sezione G.2* che dà indicazioni riguardo le verifiche di stabilità e le indagini specifiche dei pendii naturali.

La *sezione G.2.1* riporta:

*"La stabilità dei pendii è influenzata da numerosi fattori tra i quali è generalmente necessario prendere in considerazione:*

- a) *caratteristiche morfologiche;*
- b) *caratteristiche geologiche e proprietà fisico-meccaniche dei terreni costituenti il pendio; caratteristiche e circolazione delle acque sotterranee;*
- c) *peso proprio ed azioni esterne applicate alle opere insistenti sul pendio;*
- d) *carattere sismico della zona;*
- e) *fattori ambientali”*

La successiva *parte G.2.2.* tratta le indagini specifiche da eseguire come lo studio geologico delle discontinuità, e geomorfologico del pendio, come anche le caratteristiche in termini di pressioni neutre, franosità. Le indagini in sito devono essere compensate da opportuni test di laboratorio che serviranno per determinare i parametri specifici del terreno di interesse, come la resistenza al taglio.

La parte su cui si pone più attenzione, ai fini di questo studio, è però la *sezione G.2.3* che riguarda i calcoli di stabilità, per quanto concerne i pendii in zona sismica si riporta il seguente frammento:

*“Per i pendii ricadenti in zona sismica, la verifica di stabilità deve essere eseguita tenendo conto delle azioni sismiche, come prescritto dalle norme sismiche. Il valore del coefficiente di sicurezza sarà assunto dal progettista e giustificato in base al livello di conoscenze raggiunto e al grado di affidabilità dei dati disponibili, alla complessità della situazione geologica e geotecnica, all'esperienza locale su pendii in situazioni simili, alle conseguenze di un'eventuale frana.”*

Considerando entrambi i decreti si può vedere come il primo non fornisce informazioni specifiche che concernono i metodi da usare per le analisi, né riguardo l'assunzione delle azioni sismiche. Il *D.M. 11.3.1988* fornisce anch'esso prescrizioni generali e lascia libertà sulla valutazione del coefficiente di sicurezza. Quindi, in generale, le azioni verticali si possono trascurare mentre per quelle orizzontali viene considerata  $F_H = K_h W$  (forza sismica pseudostatica) dove  $K_h = C$  (coefficiente di intensità sismica che varia a seconda della categoria di zona sismica da 0,04 per la terza categoria, a 0,07 per la seconda e 0,10 per la prima) =  $(S-2)/100$  con  $S$  inteso come grado di sismicità e si può valutare il problema di analisi di stabilità con i metodi pseudostatici.

A seguito del terremoto che colpì Molise e Puglia nel 2002, la Protezione civile adottò all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri *Ord. P.C.M. 20.3.2003 n.3274* (Gazzetta Ufficiale N. 105 del 08 Maggio 2003), col fine di aggiornare la classificazione sismica e le norme

antisismiche. Differentemente da quanto previsto dalla normativa precedente (che prevedeva 3 gradi di sismicità e le zone non classificate che venivano intese come non sismiche) con questa ordinanza, l'intero territorio nazionale viene suddiviso in 4 zone e interamente classificato come sismico.

L'Ordinanza suddetta tratta i: *“Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica”*.

Ed è composta da quattro Allegati:

1. Criteri per l'individuazione delle zone sismiche;
2. Valutazione e adeguamento sismico degli edifici;
3. Norme tecniche per il progetto sismico ponti;
4. Norme tecniche per il progetto sismico di opere di fondazione e di sostegno dei terreni.

zona	accelerazione orizzontale con probabilità di superamento pari al 10 % in 50 anni [ $a_g/g$ ]	accelerazione orizzontale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico (Norme Tecniche) [ $a_g/g$ ]
1	> 0,25	0,35
2	0,15-0,25	0,25
3	0,05-0,15	0,15
4	<0,05	0,05

*Fig 1.8. Tabella che riporta le principali 4 zone sismiche con i relativi valori di accelerazione orizzontale  $a_g$  (da Norme Tecniche e Ord. P.C.M. 20.3.2003 n.3274)*

Nel primo comma del decreto si enuncia che: *“Le Norme Tecniche forniscono 4 valori di accelerazioni orizzontali  $a_g/g$  di ancoraggio dello spettro di risposta elastico e le norme progettuali da rispettare, quindi le zone stabilite sono quattro. Ogni zona sarà individuata secondo i valori di accelerazione di picco orizzontale  $a_g$  del suolo con probabilità di superamento del 10% in 50 anni”*. In fig. 1.8 sono riportate le 4 zone sismiche, di pericolosità sismica decrescente, con i relativi valori limite dell'accelerazione massima del suolo  $a_g$ .

Le zone 1,2,3, sono rispettivamente di sismicità alta, media e bassa, mentre per quanto riguarda la quarta si lascia alle regioni, la valutazione di imporre l'obbligo della progettazione antisismica (che varia a livelli di severità crescenti). Si può vedere quindi una similitudine fra la suddivisione in zone sismiche e le Norme tecniche.

Si passa ora ad accennare quanto prescritto dagli Eurocodici. In particolare, nell'*Eurocodice 7 “EC 7: Progettazione Geotecnica - PARTE I: Criteri Generali”* entrano in gioco le grandezze  $E_d$

(valore di progetto degli effetti di tutte le azioni) e  $Rd$  (valore di progetto delle resistenze corrispondenti) ovvero rispettivamente le azioni e le resistenze dove deve valere:  $Ed < Rd$  nelle verifiche di stato limite di rottura e deformazione.

Nelle analisi delle azioni e delle resistenze sono presenti i valori di progetto delle azioni, delle caratteristiche dei materiali, dei dati geometrici. Per valore di progetto si intende il valore caratteristico abbinato ad un coefficiente di sicurezza parziale ( $\gamma$ ) che si applica alle azioni e agli effetti delle azioni ( $E$ ) e alle resistenze ( $R$ ) e alle proprietà del terreno. In Fig 1.9 è riportata una tabella riassuntiva dei coefficienti parziali e delle combinazioni delle azioni.

Approccio	Combinazione	Azioni A (sfavorevoli)			Materiali M			Resistenze R
		perman.	variabili	$tg\phi'$	$c'$	$c_u$	$\gamma$	
<b>DA1</b>	<b>A1+M1+R1</b>	<b>1,35</b>	<b>1,5</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>
	<b>A2+M2+R1</b>	<b>1,0</b>	<b>1,3</b>	<b>1,25</b>	<b>1,25</b>	<b>1,4</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>
<b>DA2</b>	<b>A1+M1+R2</b>	<b>1,35</b>	<b>1,5</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,1</b>
<b>DA3</b>	<b>A2+M2+R3</b>	<b>1,0</b>	<b>1,3</b>	<b>1,25</b>	<b>1,25</b>	<b>1,4</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>

Fig 1.9. Tabella che riporta le combinazioni delle azioni previste dall' Eurocodice 7 per quanto concerne l'analisi di stabilità dei pendii

L'Eurocodice 8, EC 8: "Progettazione sismica delle strutture - Parte I" ricava il valore dell'accelerazione massima di riferimento su terreno di tipo A da mappe di zonazione nazionali e le categorie di suolo non differiscono da quelle nell' Ord. P.C.M. 20.3.2003 ma cambiano i valori di  $S$  (grado di sismicità). La "Parte V - Fondazioni, Opere di sostegno e Geotecnica" tratta: "I criteri, le regole ed i requisiti per la scelta del piano di posa e del terreno di fondazione. Essa abbraccia il progetto di diversi sistemi di fondazione ed opere di sostegno, nonché l'interazione terreno-struttura, in presenza di azione sismica, e completa pertanto le regole dell'Eurocodice 7, che non contemplano i requisiti specifici della progettazione sismica."

L'interazione tra struttura e terreno è un aspetto molto importante e viene trattato sotto vari punti. In primo luogo, si accenna al significato di Stato Limite per i pendii in zona sismica,

ovvero la condizione oltre la quale si verificano spostamenti non accettabili della massa di terreno, considerata ad una profondità significativa per l'influenza sull'opera sovrastante.

Ci sono, inoltre, indicazioni riguardo la verifica di stabilità per le opere poste su pendii naturali o artificiali, dove devono essere fatte verifiche sulle condizioni del terreno, in modo da assicurare la sicurezza e funzionalità della struttura sovrastante. Si indica che i metodi che si da utilizzare devono essere di tipo dinamico, oppure ad elementi finiti o del blocco rigido (i metodi pseudostatici si possono usare quando non ci sono forti irregolarità topografiche e stratigrafiche e se non è presente degradazione della resistenza e un incremento significativo delle pressioni interstiziali sotto condizioni cicliche. Per quanto riguarda le condizioni di stato limite e la valutazione della superficie di slittamento più critica, si valutano gli spostamenti con il modello di blocco rigido.

Quindi è evidente come l'approccio degli *Eurocodici* vede il passaggio ad una prassi di tipo prestazionale, abbandonando quindi il tratto prescrittivo dei precedenti approcci. In questo caso gli obiettivi della progettazione e le procedure di analisi strutturale e dimensionamento degli elementi vengono descritti e trattati nel dettaglio.

## 1.2 Analisi di stabilità dei pendii in condizioni sismiche

### 1.2.1 Introduzione

*Mononobe (1929) e Okabe (1924)* sono stati i primi a introdurre la sollecitazione sismica nelle analisi di stabilità dei pendii. Idearono il metodo pseudostatico, ovvero un'analisi all'equilibrio limite in cui la forza d'inerzia data dall'evento sismico è rappresentata sotto forma di forze statiche. Questo metodo, è stato ampiamente adottato per la sua semplicità, perché coinvolge un numero di parametri non elevato e risponde al problema attraverso un coefficiente di sicurezza. Il limite del metodo è quello di rappresentare effetti dinamici complessi con forze statiche, per questo motivo risulta poco preciso e non rappresenta al meglio il problema dinamico.

Newmark nel 1965 prese in considerazione lo spostamento accumulato dal terreno (irreversibile) sotto effetto di scuotimento sismico come parametro limite.

Propose il "*modello semplificato del blocco rigido*" per calibrare quel parametro limite e per la prima volta si tenne conto della natura dinamica dell'analisi di stabilità. Anche questo metodo però rivela dei limiti come la non completa presa in considerazione della capacità deformativa del corpo instabile infatti il modello schematizza la massa in un blocco indeformabile e le deformazioni sono considerate tra substrato rigido e superficie del blocco. Il problema della deformabilità del corpo instabile si può risolvere utilizzando analisi dinamiche che considerano il problema con metodi alle differenze finite o agli elementi finiti. In generale, si possono raggruppare i metodi per l'analisi di stabilità in tre categorie:

- *metodi pseudostatici;*
- *metodi degli spostamenti (analisi dinamica semplificata);*
- *metodi di analisi dinamica avanzata*

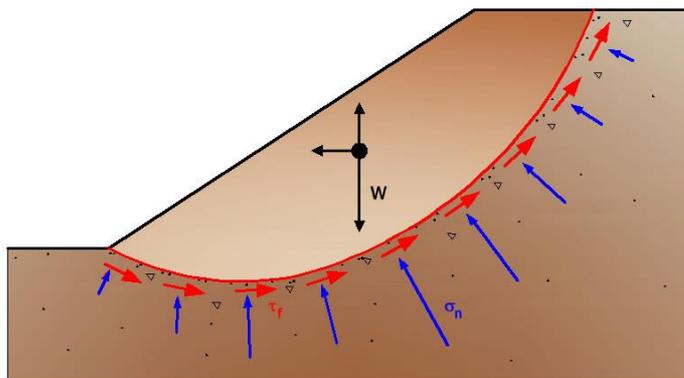
Gli elementi che distinguono i metodi sono: il modo di rappresentare l'azione sismica (costante o variabile nel tempo, mediante l'uso parametri rappresentativi del moto sismico o dell'intera storia temporale dell'evento); poi per il modello di comportamento del terreno adottato, per come viene valutata la condizione di stabilità, se tramite un fattore di sicurezza o valutando spostamenti e deformazioni permanenti. Ogni metodo differisce inoltre per il tipo

di approccio, che può essere analitico o numerico, si considerano l'equilibrio limite, l'analisi limite, alle differenze finite o agli elementi finiti.

Si considera anche un'altra importante distinzione tra metodi dinamici e pseudostatici che riguarda la considerazione della condizione limite di riferimento. Nei metodi dinamici si può eseguire una verifica allo stato limite ultimo o allo stato limite di danno, confrontando gli spostamenti e le deformazioni accumulate durante il sisma e i valori limite di spostamento o deformazione di riferimento. Mentre nei metodi pseudostatici, si considera l'equilibrio limite o di collasso incipiente corrispondente al solo stato limite ultimo.

### 1.2.2 Analisi pseudostatica

Nell'approccio di analisi pseudostatica l'azione sismica è schematizzata da una forza statica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, proporzionale al peso  $W$  del concio di terreno potenzialmente instabile. Questa forza dipende dalle caratteristiche del moto sismico atteso nel volume di terreno potenzialmente instabile e dalla capacità di tale volume di subire spostamenti senza significative riduzioni di resistenza. L'equilibrio delle forze in gioco è rappresentato in *figura 1.7*.



*Fig 1.7. Schema generico del pendio con rappresentazione delle forze agenti (fonte GeoStru)*

Come accennato precedentemente, nel caso pseudostatico, la condizione limite di riferimento è considerata nelle verifiche allo stato limite ultimo.

Le componenti della forza sismica, si possono scomporre in una componente orizzontale e una verticale:

$$F_h = k_h \times W \quad (1.1)$$

$$F_v = k_v \times W \quad (1.2)$$

Dove  $k_h$  e  $k_v$  sono chiamati *coefficienti sismici orizzontale e verticale* e valgono rispettivamente:

$$k_h = \beta_s \times \frac{a_{max}}{g} \quad (1.3)$$

$$k_v = \pm 0,5 \times k_h = \pm 0,5 \times \beta_s \times \frac{a_{max}}{g} \quad (1.4)$$

In cui  $g$  è l'accelerazione di gravità e  $\beta_s$  rappresenta il coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito  $a_{max}$  i cui valori sono in *fig 1.8*.

	Categorie di sottosuolo	
	A	B, C, D, E
	$\beta_s$	$\beta_s$
$0.2 < a_g(g) \leq 0.4$	0.30	0.28
$0.1 < a_g(g) \leq 0.2$	0.27	0.24
$a_g(g) \leq 0.1$	0.20	0.20

*Fig 1.8. Valori del coefficiente di riduzione secondo le Norme tecniche NTC 08*

Il valore dell'accelerazione massima, qualora fossero assenti analisi specifiche di risposta sismica locale, secondo *le NTC 2008 (par 7.11.6.2)* può essere valutata con la relazione:

$$a_{max} = S \times a_g = S_s \times S_T \times a_g \quad (1.5)$$

$S$  è il coefficiente che comprende l'effetto dell'amplificazione stratigrafica ( $S_s$ ) e dell'amplificazione topografica  $S_T$  mentre  $a_g$  è accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido. Nella pratica di progettazione per valutare la condizione limite si fa uso dei valori caratteristici dei parametri geotecnici e ci si riferisce alla superficie di scorrimento critica con il valore più basso del margine di sicurezza, che deve essere valutato e motivato durante l'analisi di stabilità. Questo margine di sicurezza viene identificato con un *fattore di sicurezza FS* che rappresenta il rapporto tra la *resistenza al taglio disponibile* lungo la superficie di scorrimento e lo *sforzo di taglio* mobilitato, ovvero:

$$FS = \frac{\tau_s}{\tau_m} \quad (1.6)$$

un coefficiente di sicurezza pari all'unità implica una condizione di equilibrio limite o collasso incipiente, per valori maggiori di uno si ha invece una situazione di sicurezza maggiore.

In questo tipo di approccio si fanno varie assunzioni riguardante il terreno (mezzo rigido perfettamente plastico), la rottura sulla superficie di scorrimento (si raggiunge in tutti i punti della superficie di scorrimento) e riguardo al criterio di resistenza sulla superficie di scorrimento si utilizza il *criterio di Mohr-Coulomb* in termini di tensioni efficaci:

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \tan\phi' \quad (1.7)$$

dove  $\sigma'_n$  è la tensione normale efficace sulla superficie di scorrimento o in termini di tensioni totali, mediante il *criterio di Tresca*:

$$\tau_f = c_u \quad (1.8)$$

L'applicazione dei metodi pseudostatici nella pratica vede il ricorso a codici di calcolo mediante i metodi dell'equilibrio limite, delle strisce o globali.

### 1.2.3 Analisi dinamica semplificata (metodo degli spostamenti)

Come accennato precedentemente nell'introduzione, i metodi pseudostatici hanno il limite di considerare le forze sismiche, che sono per natura cicliche e transitorie, tramite forze statiche che invece sono costanti, nel tempo, in direzione e verso.

Questi limiti vengono superati tramite i metodi degli spostamenti, o anche detti metodi dinamici semplificati, che derivano dal modello del blocco rigido di Newmark (1965).

Il comportamento dei pendii in condizioni dinamiche è principalmente governato dalle azioni inerziali indotte dal sisma o dalla riduzione della resistenza al taglio, (causata dagli incrementi delle pressioni interstiziali e dalla degradazione delle caratteristiche di resistenza). Questi fenomeni di instabilità portano ad un incremento di spostamenti che si verifica durante il sisma, mentre l'instabilità indotta da una riduzione della resistenza al taglio si sviluppa prevalentemente nelle condizioni statiche post sisma.

Ne deriva che lo studio dell'instabilità deve essere condotto sia durante che dopo l'evento, nel primo caso l'analisi deve considerare il pendio sottoposto ad azioni transitorie; nelle

condizioni post-sismiche invece, si valuta la sicurezza del pendio rispetto ad un possibile meccanismo di collasso guidato dalle azioni gravitazionali.

Il metodo degli spostamenti è adatto allo studio dei fenomeni di instabilità associati agli effetti inerziali, nel quale, con procedure analitiche semplici, si valutano gli spostamenti permanenti indotti dal raggiungimento della resistenza disponibile lungo la superficie di scorrimento. Si considera l'intera storia temporale dell'evento sotto forma di accelerogrammi rappresentativi dell'area interessata allo studio che costituiscono la funzione temporale, la reazione del pendio in condizioni dinamiche si valuta sotto forma di spostamenti accumulati tramite una procedura di doppia integrazione nel tempo della storia di accelerazioni e quindi del moto relativo della massa interessata all'analisi di stabilità. In questo caso la condizione limite viene valutata sia allo stato limite ultimo e quindi di collasso, sia in termini di perdita di funzionalità e quindi allo stato limite di servizio. Il volume instabile di terreno, soggetto a forza peso e a quella sismica, viene considerato come un blocco rigido che si muove lungo una superficie di scorrimento. Il corpo si muove sulla superficie di scorrimento ogni volta che *l'accelerazione di base  $a(t)$*  supera quella *critica  $a_c$*  che costituisce un valore critico. Quando *l'accelerazione* cambia segno e annulla la velocità relativa tra terreno e blocco, lo spostamento è pari a zero. Gli spostamenti cumulati si calcolano tramite doppia integrazione rispetto al tempo dell'accelerazione relativa fra blocco e piano di scivolamento. Ogni intervallo di integrazione parte dall'istante di tempo in cui *l'accelerazione* supera la soglia ovvero *l'accelerazione critica  $a_c$* . Questo valore di accelerazione, è quello per cui il blocco si trova in condizioni di equilibrio limite e termina quando la velocità relativa tra piano di scivolamento e blocco diventa pari a zero, annullandosi. La somma del numero di volte in cui *l'accelerazione di base* supera quella critica darà lo spostamento finale, che sarà maggiore quanto maggiore è l'intervallo in cui avviene il superamento di  $a_c$ . Da qui deriva una forte dipendenza del metodo sia dalle caratteristiche della massa instabile, che dall'ampiezza e dal contenuto in frequenza dell'azione sismica.

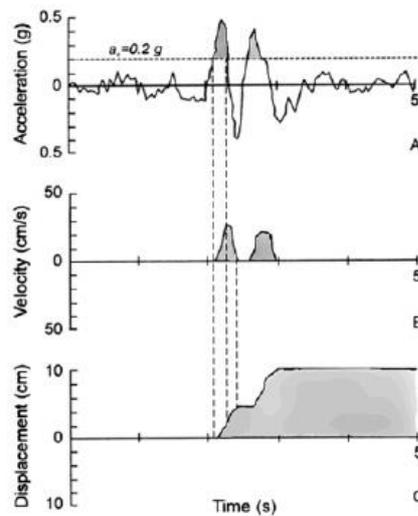


Fig 1.8. Rappresentazione della procedura del metodo per doppia integrazione dell'accelerazione.

Le assunzioni del metodo originario di Newmark sono state l'utilizzo dello stesso accelerogramma per tutta la massa instabile, quindi un'accelerazione di base costante nel tempo e l'assunzione che la resistenza al taglio del terreno fosse uguale sia in condizioni dinamiche che statiche (ciò implica l'accelerazione critica costante nel tempo). L'analisi degli spostamenti si esegue in varie fasi illustrate schematicamente in *figura 1.9* (nella prima fase la ricerca della superficie di scorrimento potenziale avviene con il metodo pseudostatico).

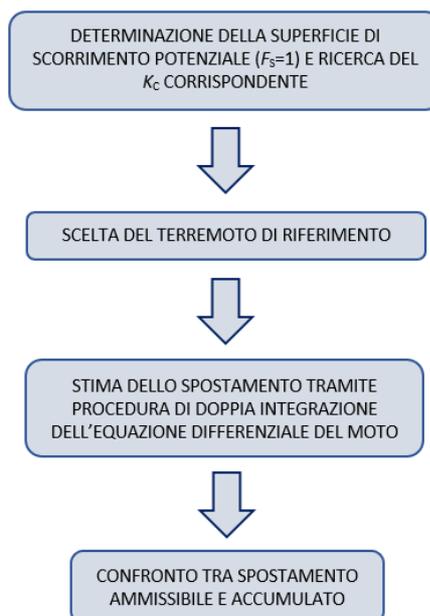
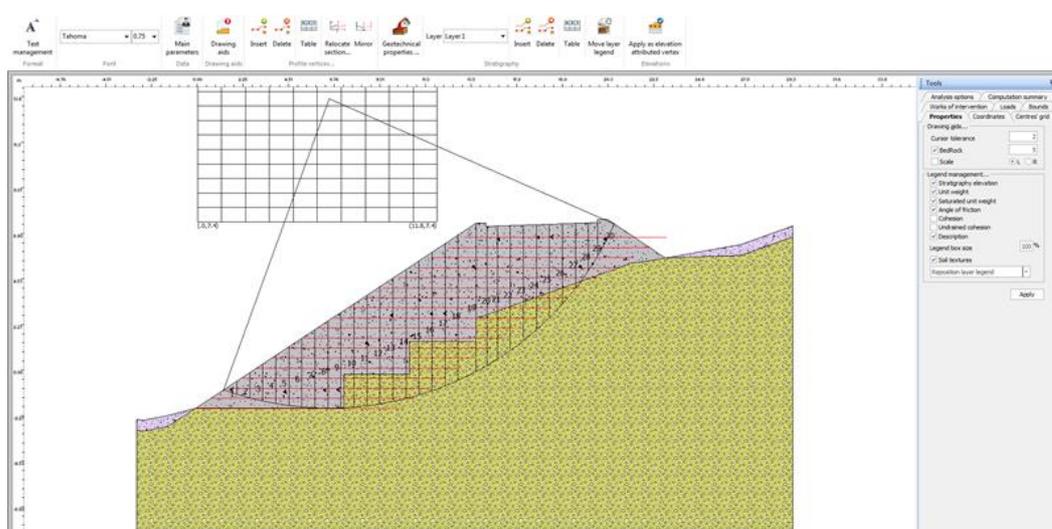


Fig 1.9. Schematizzazione delle fasi del metodo di Newmark.

Questo metodo, pur superando i limiti dell'approccio pseudostatico presenta comunque dei limiti legati alla dipendenza dai parametri e dalle caratteristiche dell'accelerogramma ( $a_{max}$ , forma, durata e contenuto in frequenza), ciò implica che quest'ultimo debba essere scelto in modo molto accurato, a seguito di analisi di pericolosità sismica. Si farà utilizzo di almeno 5 accelerogrammi, che dovranno essere scalati all'accelerazione  $a_g$  del sito in esame.

#### **1.2.4 Analisi dinamica avanzata**

La terza categoria di metodi usati per l'analisi di stabilità, oltre alle due citate sopra, è quella che comprende i metodi dinamici avanzati. Quest'ultimi si basano su un'analisi numerica avanzata tramite l'uso di strumenti e codici di calcolo automatici, i metodi dinamici avanzati più noti e utilizzati sono quelli agli elementi finiti e alle differenze finite. Le analisi numeriche alla base di questi metodi devono essere svolte avendo eseguito un dettagliato studio del sottosuolo, della stratigrafia e di tutti i parametri e le caratteristiche del terreno costituente il pendio interessato da instabilità. Le analisi dinamiche avanzate hanno diversi limiti tra cui il principale è la difficoltà di modellazione accurata delle condizioni geotecniche dell'area oggetto di analisi e quelli legati alla ricerca del sisma di riferimento. Per svolgere uno studio affidabile, l'area di terreno da modellare deve essere estesa e ciò porta a difficoltà in quanto il problema è discretizzato al finito ed è complesso simulare sui contorni del reticolo discretizzato, la dissipazione dell'energia che avviene durante l'evento sismico. Ne consegue quindi la complessità di rappresentazione realistica delle condizioni del terreno soggetto a instabilità.



*Fig 1.10 Esempio di modellazione e discretizzazione di un pendio soggetto ad instabilità tramite il software di calcolo Slope che implementa i metodi di equilibrio limite a modelli numerici avanzati (DEM) (fonte GeoStru)*

## 1.3 Valutazione della pericolosità sismica

### 1.3.1 Introduzione

Con il termine sismicità si intende la frequenza e la forza con cui si manifestano gli eventi sismici ed è caratteristica fisica di un determinato territorio.

Un importantissimo elemento è la conoscenza e lo studio della pericolosità sismica di un determinato sito oggetto di studio e ciò si può fare tramite la conoscenza della frequenza e l'energia associate ai terremoti che caratterizzano quel determinato territorio. Questa sarà tanto più elevata quanto sarà più alta la probabilità che si verifichi un sisma con magnitudo elevata, a parità di intervallo di tempo considerato. Nello specifico si attribuisce un valore di probabilità di accadimento del terremoto con una propria magnitudo, in un determinato intervallo di tempo. La valutazione della pericolosità è basata sulla conoscenza di diversi parametri di input relativi alla sorgente del sisma e delle caratteristiche del moto.

Nel 2003, per la prima volta, tramite un'ordinanza, è stato possibile avviare un percorso per la stima della pericolosità riguardante il territorio nazionale italiano e tutte le procedure necessarie di assegnazione ai comuni interessati.

L'INGV ha realizzato la *Mappa di Pericolosità Sismica 2004 (MPS04)* che indica la pericolosità sismica attraverso un parametro fondamentale ovvero *l'accelerazione massima attesa  $a_g$*  con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni su suolo rigido e pianeggiante.

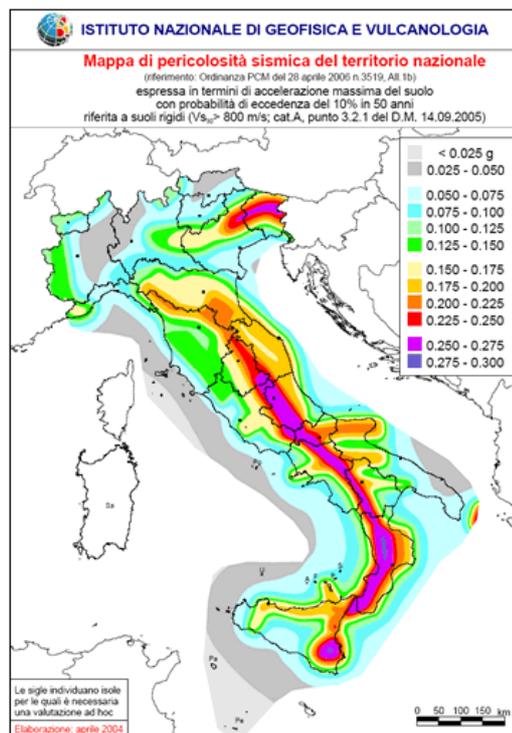
Nel presente elaborato, per la valutazione della pericolosità del sito si è fatto riferimento al sito web dell'*Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, INGV*, tramite l'uso e la lettura delle mappe interattive di pericolosità sismica.

Le mappe sono costituite da punti che formano una griglia di calcolo, che ha una densità di 20 punti per grado, circa 1 punto ogni 5 km.

La pericolosità sismica si può valutare con due tipologie di metodi:

- Metodi deterministici che partono da valori di scuotimento del suolo attesi a seguito di un terremoto di riferimento definito per il sito di interesse;
- Metodi probabilistici che considerano gli effetti di tutti gli eventi sismici potenziali capaci di influenzare una determinata zona.

In *Fig. 1.11* si può vedere come si presenta la mappa di pericolosità sismica nazionale sul sito dell'INGV, con i vari valori di accelerazione al suolo  $a_g$ .



*Fig 1.11. Mappa di Pericolosità sismica di riferimento per il territorio nazionale*

Altri due fattori molto importanti sono la *vulnerabilità* e l'*esposizione*, determinanti per l'impatto che l'evento sismico avrà su territorio e strutture presenti. Per vulnerabilità si intende la predisposizione di un'opera ad essere danneggiata, dipende dalle caratteristiche dei materiali di costruzione, dalla loro qualità, dalla manutenzione e progettazione. L'esposizione invece è la presenza rilevante o meno di beni esposti al rischio, quindi la possibilità di perdite in termini economici, artistici, culturali e di vite umane.

L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, INGV ha dichiarato:

*“L'Italia ha una pericolosità sismica medio-alta (per frequenza e intensità dei fenomeni), una vulnerabilità molto elevata (per fragilità del patrimonio edilizio, infrastrutturale, industriale, produttivo e dei servizi) e un'esposizione altissima (per densità abitativa e presenza di un patrimonio storico, artistico e monumentale unico al mondo). La nostra Penisola è dunque ad elevato rischio sismico, in termini di vittime, danni alle costruzioni e costi diretti e indiretti attesi a seguito di un terremoto.”*

Il territorio nazionale è stato quindi diviso in zone sulla base dell'intensità e frequenza dei passati eventi sismici. Ad ogni zona è stato assegnato un determinato valore dell'azione sismica, che viene poi usato in progettazione, ovvero l'*accelerazione massima su roccia*  $a_g$ .

Si è stilato l'elenco dei comuni classificati in ordine di pericolosità decrescente dalla zona 1 alla 4 dove i valori dell'accelerazione sono: *zona 1 = 0.35g; zona 2 = 0.25g; zona 3 = 0.15g; zona 4 = 0.05g*. In *tabella 1.1* si possono leggere le caratteristiche della 4 zone e la loro suddivisione in base agli effetti del terremoto.

<b>Zona 1</b> - E' la zona più pericolosa, dove possono verificarsi forti terremoti.
<b>Zona 2</b> - Nei comuni inseriti in questa zona possono verificarsi terremoti abbastanza forti.
<b>Zona 3</b> - I Comuni interessati in questa zona possono essere soggetti a scuotimenti modesti.
<b>Zona 4</b> - E' la meno pericolosa. Nei comuni inseriti in questa zona le possibilità di danni sismici sono basse.

*Tab. 1.1 Caratteristiche delle 4 zone sismiche.*

### 1.3.2 Individuazione della pericolosità sismica del sito in esame

Nel caso in esame si è preso in considerazione il sito di Lagonegro (PZ).

Tramite le mappe interattive reperibili dal sito dell'INGV si è fatta l'analisi di pericolosità sismica del sito di Lagonegro inserendo i dati relativi di latitudine e longitudine.

La scelta del sito, deve rispondere a vari requisiti tra cui un'accelerazione  $a_g$  almeno pari a 0.15g e un tempo di ritorno  $T_R=475$  anni.

La Basilicata è una regione ad alto rischio sismico, dove sono avvenuti numerosi terremoti di grande intensità e alcuni sono stati definiti distruttivi nella zona epicentrale. Per la valutazione della pericolosità del sito prescelto, si è fatto uso delle mappe interattive di pericolosità sismica (sito ufficiale dell'INGV). Le suddette mappe, costruite con probabilità di ripresentazione dell'evento del 10% in 50 anni e con percentile 50, permettono di visualizzare la pericolosità sia a livello nazionale che più nel dettaglio a livello regionale.

La determinazione della pericolosità sismica del sito ha un ruolo importante poiché, come accennato nel paragrafo di introduzione precedente, costituisce un fondamentale elemento di conoscenza per determinare le azioni sismiche di progetto sulla base delle quali si valuta il rispetto degli stati limite.

I parametri principali sul quale viene definita la pericolosità sismica sono:

- L'accelerazione orizzontale massima attesa  $a_g$  in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido, con superficie topografica orizzontale (categoria A, ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di  $V_s > 800$  m/s)
- Le ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente  $S_e(T)$ , con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza  $P_{VR}$  nella vita di riferimento  $V_R$ .

Stato Limite		$P_v$
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLU	10%
	SLC	5%

Tab 1.2 Probabilità di eccedenza

Spostando il cursore lungo la mappa interattiva presente sul sito ufficiale dell'INGV e selezionando il parametro di scuotimento, si sono potute disegnare le mappe con due configurazioni diverse; secondo l'accelerazione orizzontale massima attesa  $a_g$  (Fig 1.12) e secondo lo spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente  $Se(T)$  (Fig 1.13).

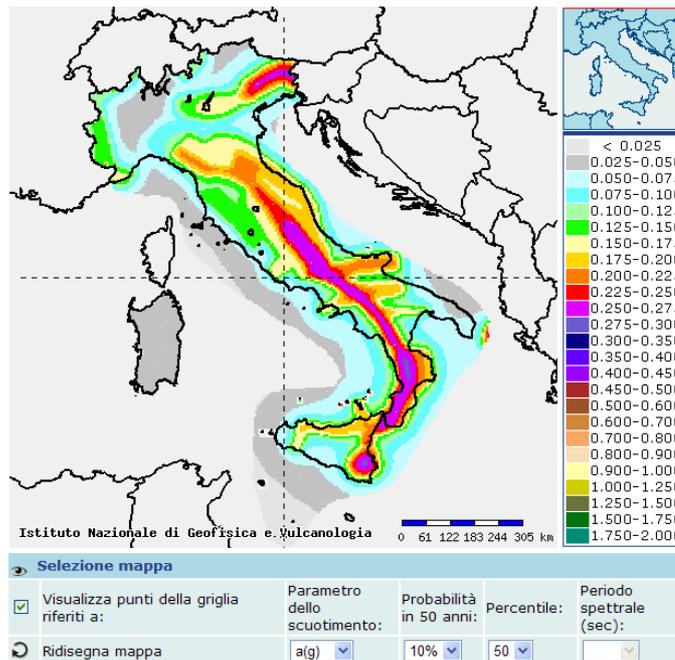


Fig 1.12. Mappa interattiva di Pericolosità sismica secondo  $a_g$

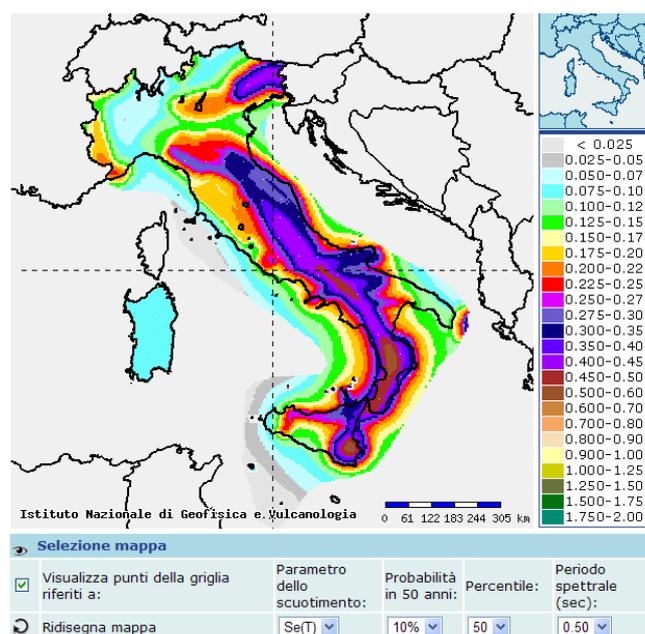


Fig 1.13 Mappa interattiva di Pericolosità sismica secondo  $Se$

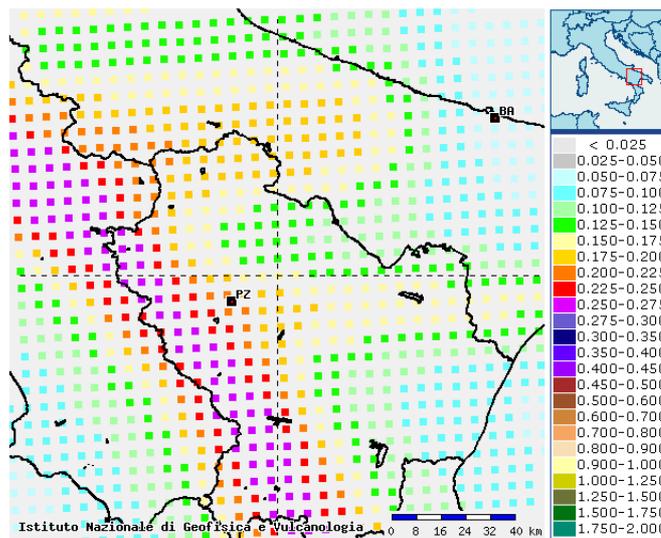


Fig 1.14 Mappa di Pericolosità sismica di riferimento alla regione Basilicata

Selezionando il comune interessato si è potuto vedere nel dettaglio i valori di  $a_g$  e disegnare la mappa nella zona prescelta. Spostando il cursore sulla funzione *Grafico sul punto griglia* si è potuto visualizzare nel dettaglio i valori di  $a_g$  per ogni punto della regione selezionata. (Fig 1.15). Riguardo la zona di Potenza si nota che il valore di pericolosità sismica espresso in termini di  $a_g$  ovvero accelerazione orizzontale massima attesa al suolo è compresa tra i valori 0,220g -0,225g (zone arancioni) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita a suoli rigidi ( $V_s > 800$  m/s, categoria A).

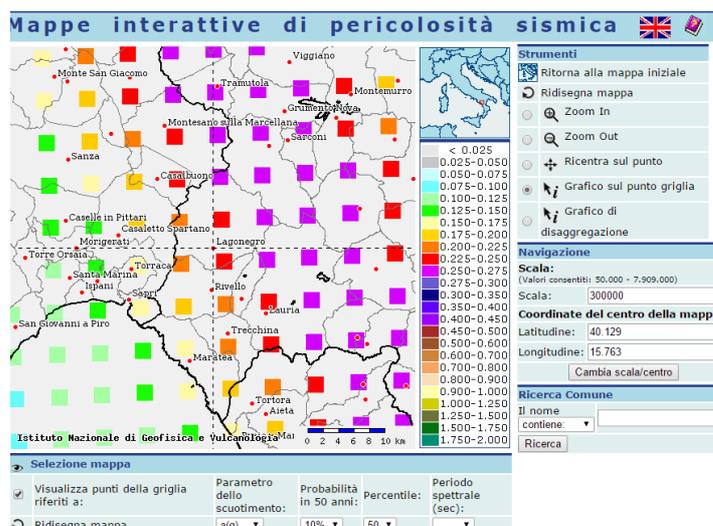


Fig 1.15 Mappa di Pericolosità sismica di riferimento al comune scelto in termini di  $a_g$

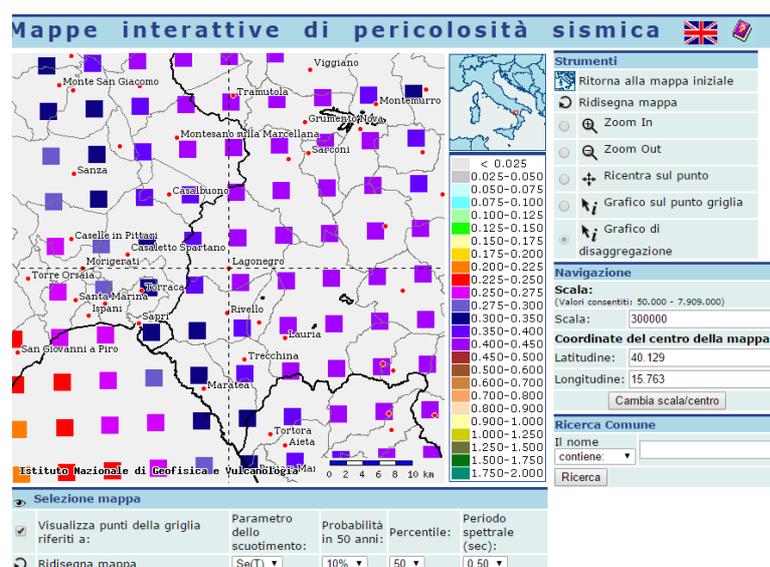


Fig 1.16 Mappa di Pericolosità sismica di riferimento al comune scelto in termini di  $Se(T)$

Le forme spettrali vengono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento nella vita di riferimento  $P_{VR}$ , a partire dai valori dei seguenti parametri:

- $a_g$  ovvero l'accelerazione orizzontale massima in superficie;
- $S_{e,max}$  che rappresenta la risposta spettrale massima in accelerazione;
- $S_{Ve,max}$  che invece è risposta spettrale massima in velocità.

Lo spettro di risposta elastico  $Se(T)$  in accelerazione è espresso da una forma spettrale (spettro normalizzato) riferita ad uno smorzamento convenzionale del 5% e moltiplicata per il valore della accelerazione massima convenzionale  $a_g$  su sottosuolo di categoria A che caratterizza il sito. Sia la forma spettrale che il valore di  $a_g$  variano al variare della probabilità di superamento nella vita di riferimento  $P_{VR}$ . Per definire lo spettro di risposta in accelerazione del sito interessato si è fatto uso sempre delle mappe interattive; si è selezionato il parametro dello scuotimento" ( $Se(T)$ ) e facendo doppio click sul comune desiderato sono apparsi gli spettri  $Se(T)$  sia in forma di grafici (Fig 1.17) che di tabelle (Fig 1.18).

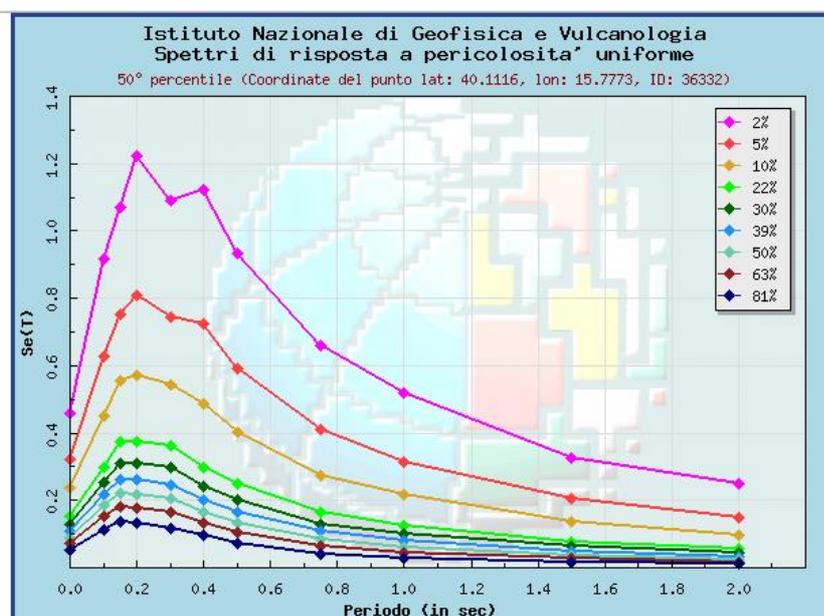


Fig 1.17 Grafico rappresentante lo spettro di risposta in accelerazione del sito selezionato

Prob. di ecc. in 50 anni	Spettri di risposta a pericolosità uniforme 50° percentile (Coordinate del punto lat: 40.1116, lon: 15.7773, ID: 36332)										
	Periodo (in sec)										
	0.00	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	0.75	1.00	1.50	2.00
2%	0.4567	0.9163	1.0720	1.2235	1.0888	1.1206	0.9321	0.6591	0.5170	0.3272	0.2475
5%	0.3230	0.6269	0.7508	0.8075	0.7457	0.7241	0.5908	0.4107	0.3150	0.2055	0.1488
10%	0.2369	0.4521	0.5566	0.5729	0.5447	0.4883	0.4021	0.2746	0.2170	0.1358	0.0958
22%	0.1545	0.2992	0.3723	0.3737	0.3617	0.2987	0.2479	0.1665	0.1266	0.0778	0.0547
30%	0.1273	0.2547	0.3112	0.3103	0.2958	0.2420	0.1992	0.1295	0.1013	0.0624	0.0439
39%	0.1068	0.2186	0.2634	0.2621	0.2459	0.2011	0.1645	0.1074	0.0811	0.0485	0.0340
50%	0.0887	0.1854	0.2204	0.2189	0.2034	0.1645	0.1319	0.0851	0.0602	0.0357	0.0258
63%	0.0715	0.1548	0.1810	0.1781	0.1645	0.1313	0.1063	0.0624	0.0445	0.0267	0.0177
81%	0.0527	0.1140	0.1353	0.1334	0.1182	0.0964	0.0709	0.0402	0.0275	0.0168	0.0104

Fig 1.18 Tabella spettro di risposta in accelerazione del sito selezionato in funzione della  $P_{VR}$

Se si fa riferimento alla zonazione sismica, che ha suddiviso l'intero territorio nazionale in quattro zone sismiche sulla base del valore di  $a_g$  definita come: "l'accelerazione orizzontale massima su suolo rigido o pianeggiante, che ha una probabilità del 10% di essere superata in 50 anni", si può classificare il comune scelto in zona 2 ovvero zona con pericolosità sismica media, dove possono verificarsi terremoti abbastanza forti.

Zona sismica	Fenomeni riscontrati	Accelerazione con probabilità di superamento del 10% in 50 anni
1	Zona con pericolosità sismica <b>alta</b> . Indica la zona più pericolosa, dove possono verificarsi forti terremoti.	$a_g \geq 0,25g$
2	Zona con pericolosità sismica <b>media</b> , dove possono verificarsi terremoti abbastanza forti.	$0,15 \leq a_g < 0,25g$
3	Zona con pericolosità sismica <b>bassa</b> , che può essere soggetta a scuotimenti modesti.	$0,05 \leq a_g < 0,15g$
4	Zona con pericolosità sismica <b>molto bassa</b> . E' la zona meno pericolosa, dove le possibilità di danni sismici sono basse.	$a_g < 0,05g$

Tab 1.3 Tabella riassuntiva delle zone sismiche italiane con relativa accelerazione  $a_g$

### 1.3.3 Disaggregazione della pericolosità sismica

La disaggregazione della pericolosità sismica è un'operazione che consente di valutare i contributi delle diverse sorgenti sismiche, alla pericolosità di un sito e rappresenta, in termini di magnitudo e distanza, lo scenario che dà maggior contributo alla pericolosità dell'area geografica scelta. La forma più usata di disaggregazione è quella bidimensionale in magnitudo e distanza (M-R) e permette di definire il contributo di sorgenti sismogenetiche a distanza R capaci di generare terremoti di magnitudo M. Mediante questa analisi si ottiene il terremoto che dà il maggior contributo di pericolosità. Si può ottenere anche la disaggregazione tridimensionale in M-R- $\epsilon$  ( $\epsilon$  = numero di deviazioni standard per cui lo scuotimento, in scala logaritmica, devia dal valore mediano predetto, data legge di attenuazione dati M e R).

L'analisi di disaggregazione è stata condotta per 16852 siti corrispondenti ai nodi della griglia adottata per la redazione delle mappe di pericolosità sismica del territorio nazionale.

La disaggregazione è effettuata adottando i parametri a cui corrispondono i valori di pericolosità più prossimi a quelli di riferimento. Sono stati disaggregati i valori mediani di scuotimento (relativi a suolo rigido), espresso in termini di *accelerazione orizzontale di picco (PGA)*, corrispondenti a 9 periodi di ritorno  $T_R$ : 30, 50, 72, 100, 140, 200, 475, 1000 e 2500 anni. I risultati ottenuti dallo studio di disaggregazione, in termini di M (magnitudo) e R (distanza), vengono usati per selezionare gli accelerogrammi di progetto.

Spostando il cursore sulla funzione 'Grafico di disaggregazione' e selezionando il comune interessato si sono potuti ottenere i risultati della disaggregazione tramite il grafico riportante M-R (Fig 1.19) e la tabella con i valori medi calcolati (Fig 1.20).

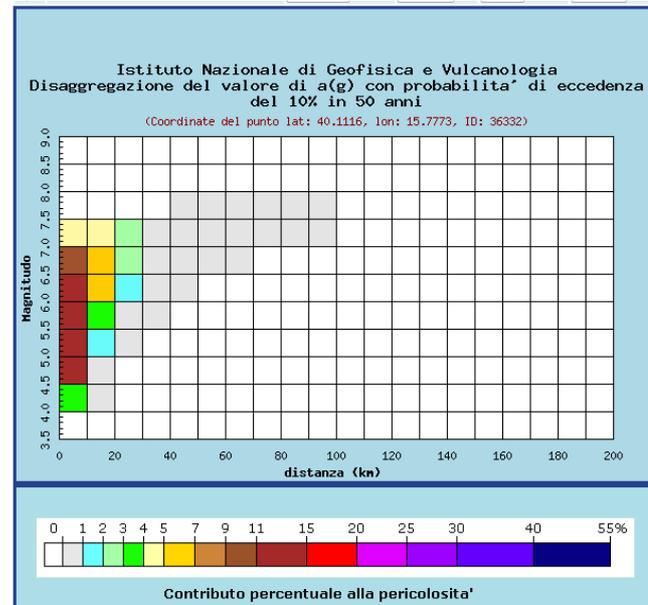


Fig 1.19 Grafico rappresentante la disaggregazione in termini M-R

Distanza in km	Disaggregazione del valore di a(g) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (Coordinate del punto lat: 40.1116, lon: 15.7773, ID: 36332)										
	Magnitudo										
	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5	8.5-9.0
0-10	0.000	3.490	11.400	13.900	14.200	12.200	9.110	4.500	0.000	0.000	0.000
10-20	0.000	0.031	0.510	1.800	3.660	5.470	6.500	4.500	0.000	0.000	0.000
20-30	0.000	0.000	0.000	0.035	0.469	1.370	2.470	2.310	0.000	0.000	0.000
30-40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.198	0.598	0.710	0.000	0.000	0.000
40-50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.147	0.237	0.000	0.000	0.000
50-60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.028	0.091	0.005	0.000	0.000
60-70	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.035	0.006	0.000	0.000
70-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.004	0.000	0.000
80-90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000
90-100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
100-110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
110-120	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
120-130	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
130-140	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
140-150	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
150-160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
160-170	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
170-180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
180-190	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
190-200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Valori medi		
Magnitudo	Distanza	Epsilon
5.970	8.830	0.650

Fig 1.20 Tabella rappresentante la disaggregazione in termini M-R

Si può osservare che a dare il maggior contributo (zona marrone) sono i terremoti di media entità e abbastanza vicini. Da questi risultati si sono andati a ricavare 7 accelerogrammi spettrocompatibili, ricercati con il software REXEL e dagli eventi registrati nelle banche dati del sito ITACA (itaca.mi.ingv.it).

### 1.3.4 Determinazione delle azioni sismiche di progetto

Una delle informazioni necessarie per la definizione dell'input sismico, oltre alla valutazione della pericolosità sismica del sito descritta nel paragrafo precedente, è l'*accelerazione di base del sito di progetto* ( $a_g$ ). Per la definizione di tale parametro sono necessari i seguenti dati:

- *Coordinate del sito;*
- *Vita di riferimento  $V_R$  come moltiplicazione della Vita nominale ( $V_N$ ) e del Coefficiente d'uso ( $C_U$ ) derivanti dalla scelta progettuale;*
- *Stati limite del progetto (ad esempio SLV ed SLD) a cui corrisponderanno differenti  $a_g$  in funzione dei diversi periodi di ritorno  $T_R$  e  $C_U$ .*

Questa operazione può essere effettuata utilizzando il foglio di calcolo *Spettri-NTC ver.1.0.3*<sup>1</sup> che fornisce gli spettri di risposta rappresentativi delle componenti (orizzontale e verticale) delle azioni sismiche di progetto, per un generico sito appartenente al territorio nazionale. In figura 1.21 si riporta la schermata di presentazione dell'interfaccia del foglio di calcolo usato, *Spettri-NTC ver.1.0.3*



Fig. 1.21 Finestra di presentazione del programma.

All'interno della fase 1 il software consente di effettuare una ricerca per comune o per coordinate (fig. 1.22).



Fig. 1.22 Finestra di lavoro relativa alla FASE 1.

Selezionato il comune, appaiono i 4 nodi del reticolo che includono il sito scelto. L'interpolazione dei dati forniti per ciascun nodo viene effettuata come media ponderata o superficie rigata (la seconda è quella consigliata); il programma controlla automaticamente la correttezza dell'interpolazione.

I dati ottenuti dalla prima fase si possono vedere in fig 1.23, 1.24, 1.25; che rispettivamente rappresentano: i grafici degli *spettri di risposta* in corrispondenza di ciascuno dei 9 periodi di ritorno  $T_R$ , poi tre diagrammi sulla variabilità dei parametri  $a_g$ ,  $F_o$  e  $T_c^*$  in funzione di  $T_R$  e infine una tabella riassuntiva dei valori degli stessi parametri.

1 Rilasciato dal *Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici* per la stima dell'azione sismica di progetto. Le coordinate devono essere in gradi sessadecimali e nel sistema di riferimento ED50.

Spettri di risposta elastici per i periodi di ritorno  $T_R$  di riferimento

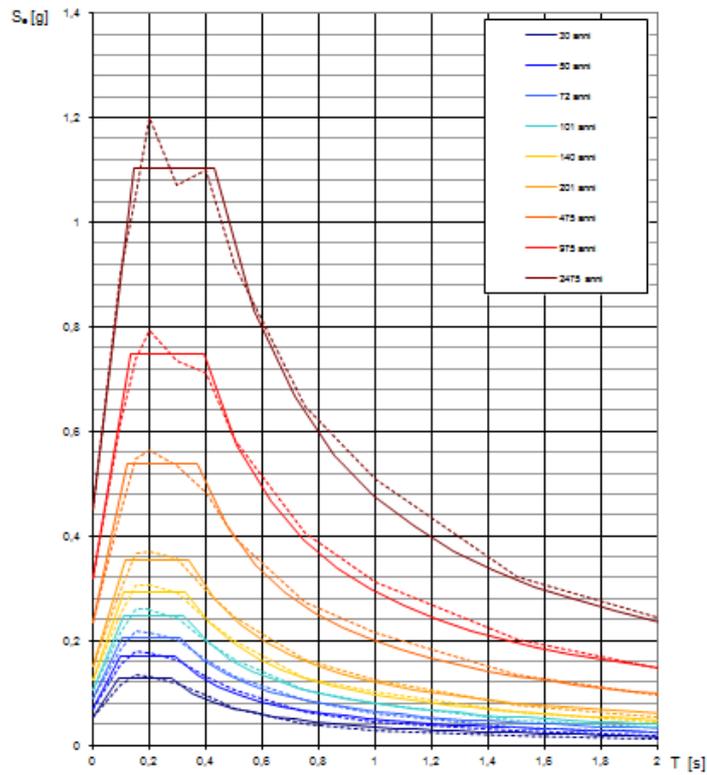
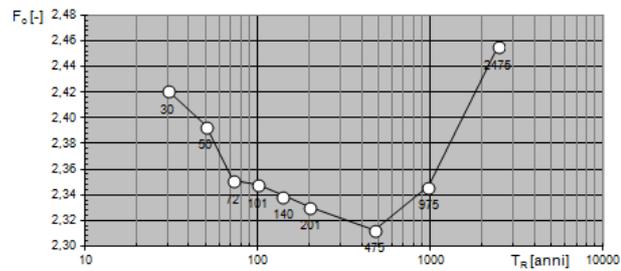
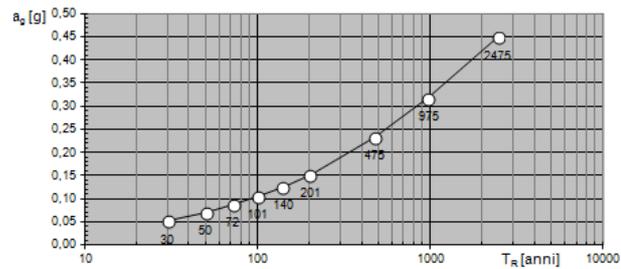
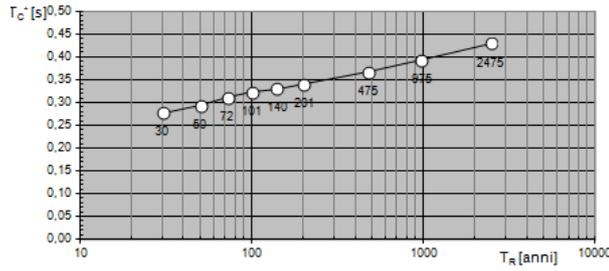


Fig.1.23 Spettri di risposta elastici forniti nella FASE 1

Valori dei parametri  $a_g$ ,  $F_0$ ,  $T_C^*$ : variabilità col periodo di ritorno  $T_R$





La verifica dell' idoneità del programma, l' utilizzo dei risultati da esso ottenuti sono onere e responsabilità esclusiva dell' utente. Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici non potrà essere ritenuto responsabile dei danni risultanti dall' utilizzo dello stesso.

Fig. 1.24 Andamento dei parametri  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_c^*$  in funzione di  $T_R$ .

Valori dei parametri  $a_g$ ,  $F_0$ ,  $T_c^*$  per i periodi di ritorno  $T_R$  di riferimento

$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_0$ [-]	$T_c^*$ [s]
30	0,052	2,421	0,277
50	0,071	2,394	0,293
72	0,088	2,351	0,311
101	0,105	2,348	0,323
140	0,126	2,339	0,330
201	0,152	2,331	0,341
475	0,233	2,313	0,367
975	0,318	2,347	0,393
2475	0,450	2,456	0,429

La verifica dell' idoneità del programma, l' utilizzo dei risultati da esso ottenuti sono onere e responsabilità esclusiva dell' utente. Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici non potrà essere ritenuto responsabile dei danni risultanti dall' utilizzo dello stesso.

Fig.1.25 Tabella riassuntiva dei valori dei parametri  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_c^*$  in funzione di  $T_R$ .

A questo punto si può passare alla seconda fase, relativa alla strategia di progettazione di cui si illustra una schermata in fig 1.26.

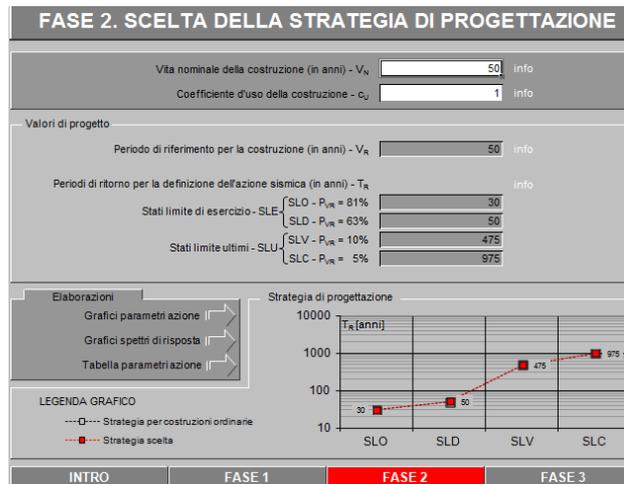


Fig. 1.26 Finestra di lavoro relativa alla FASE 2

Si è considerata una *vita nominale*  $V_N$  pari ad 50 anni, appartenente a *classe d'uso II* ( $C_U = 1$ ), ne deriva quindi una *vita di riferimento*  $V_R$  di 50 anni. Il foglio di calcolo esegue in automatico il calcolo dei vari periodi di ritorno che corrispondono alle probabilità di superamento per gli stati limite previsti dalle *NTC08*. In *fig. 1.27, 1.28, 1.29* sono riportati i dati e i diagrammi ottenuti con la seconda fase.

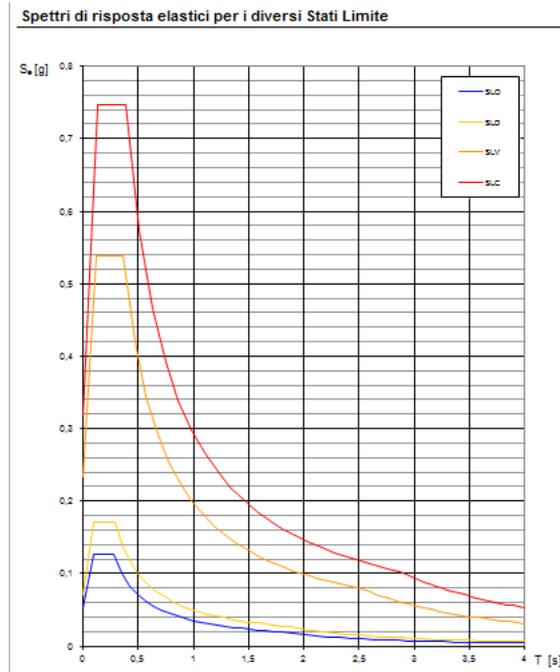


Fig. 1.27 Spettri di risposta elastici per gli Stati Limite previsti dalle NTC08

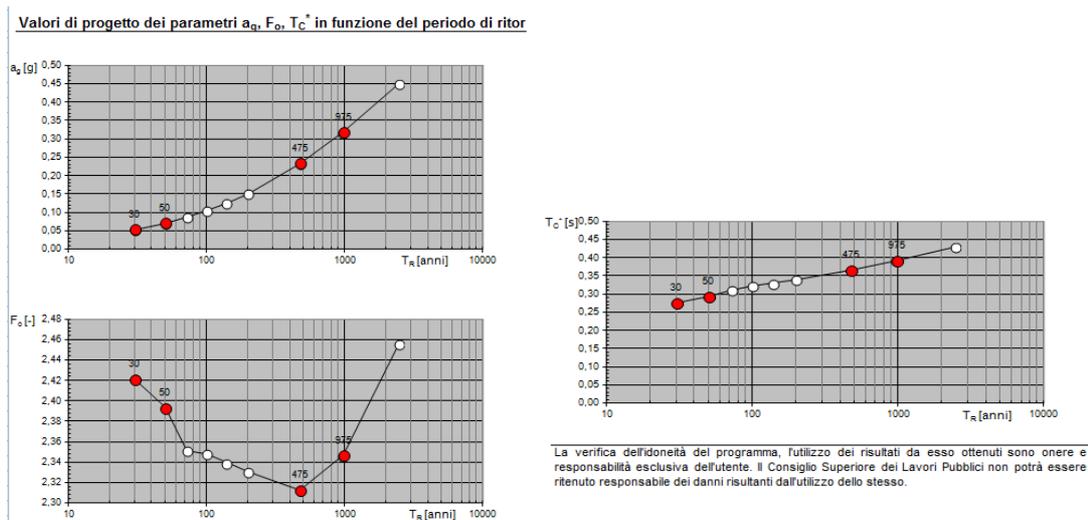


Fig. 1.28 Andamento dei parametri  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_C^*$  in funzione di  $T_R$ .

Valori dei parametri  $a_g$ ,  $F_0$ ,  $T_C^*$  per i periodi di ritorno  $T_R$  associati a ciascun

SLATO LIMITE	$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_0$ [-]	$T_C^*$ [s]
SLO	30	0,052	2,421	0,277
SLD	50	0,071	2,393	0,293
SLV	475	0,233	2,313	0,367
SLC	975	0,318	2,347	0,393

La verifica dell'idoneità del programma, l'utilizzo dei risultati da esso ottenuti sono onere e responsabilità esclusiva dell'utente. Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici non potrà essere ritenuto responsabile dei danni risultanti dall'utilizzo dello stesso.

Fig. 1.29 Tabella riassuntiva dei valori dei parametri  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_C^*$  in funzione del  $T_R$  corrispondente a ciascun Stato Limite.

In Fig. 1.29 si trovano i valori di  $a_g$  ovvero l'accelerazione di base del sito di progetto (per i vari stati limite) valore al quale bisognerà scalare ognuno dei 7 accelerogrammi, costituenti l'input sismico. Per il sito scelto di Lagonegro si è ottenuta un'accelerazione  $a_g$  pari a 0,233 g. Si passa alla terza fase dove viene determinata l'azione di progetto corrispondente agli stati limite (Fig. 1.30).

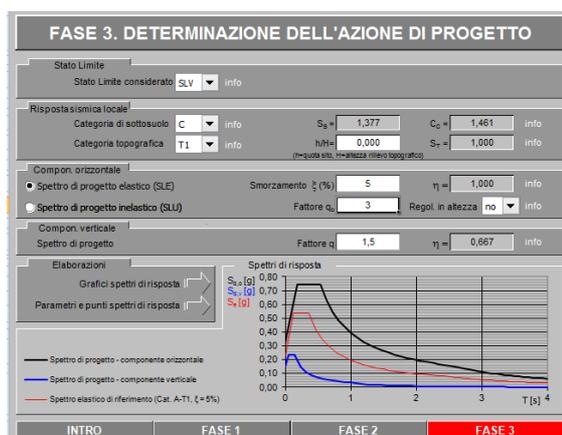


Fig. 1.30 Finestra di lavoro relativa alla FASE 3.

Selezionando lo spettro di progetto inelastico, il foglio fornisce un importante parametro come il fattore di struttura  $q$ . Nelle figure 1.31 e 1.32 sono riportati lo spettro di risposta e i parametri corrispondenti allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (SLV).

Parametri e punti dello spettro di risposta orizzontale per lo stato limSLV

Parametri indipendenti	
STATO LIMITE	SLV
$a_m$	0,233 g
$F_m$	2,313
$T_m$	0,367 s
$S_m$	1,377
$C_m$	1,461
$S_T$	1,000
$q$	1,000

Parametri dipendenti	
$S$	1,377
$\eta$	1,000
$T_m$	0,179 s
$T_c$	0,537 s
$T_D$	2,532 s

Espressioni dei parametri dipendenti

- $S = S_0 \cdot S_T$  (NTC-08 Eq. 3.2.5)  
 $\eta = \sqrt{10} \cdot (5 + \xi) \geq 0,55; \eta = 1/q$  (NTC-08 Eq. 3.2.6; §. 3.2.3.5)  
 $T_m = T_c / 3$  (NTC-07 Eq. 3.2.8)  
 $T_c = C_m \cdot T_m$  (NTC-07 Eq. 3.2.7)  
 $T_D = 4,0 \cdot a_m / g + 1,6$  (NTC-07 Eq. 3.2.9)

Punti dello spettro di risposta		
	T [s]	S <sub>g</sub> [g]
	0,000	0,321
$T_m$	0,179	0,742
$T_c$	0,537	0,742
	0,632	0,630
	0,727	0,548
	0,822	0,484
	0,917	0,434
	1,012	0,393
	1,107	0,360
	1,202	0,331
	1,297	0,307
	1,392	0,286
	1,487	0,268
	1,582	0,252
	1,677	0,237
	1,772	0,225
	1,867	0,213
	1,962	0,203
	2,057	0,194
	2,152	0,185
	2,247	0,177
	2,342	0,170
	2,437	0,163
$T_D$	2,532	0,157
	2,602	0,149
	2,672	0,141
	2,741	0,134
	2,811	0,127
	2,881	0,121

$T_D = 4,0 \cdot a_m / g + 1,6$  (NTC-07 Eq. 3.2.9)

Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.4)

$0 \leq T < T_m$   $S_g(T) = a_m \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left[ \frac{T}{T_m} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \left( 1 - \frac{T}{T_m} \right) \right]$   
 $T_m \leq T < T_c$   $S_g(T) = a_m \cdot S \cdot \eta \cdot F_0$   
 $T_c \leq T < T_D$   $S_g(T) = a_m \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left( \frac{T_c}{T} \right)$   
 $T_D \leq T$   $S_g(T) = a_m \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left( \frac{T_c \cdot T_D}{T} \right)$

Lo spettro di progetto  $S_g(T)$  per le verifiche agli Stati Limite Ultimi è ottenuto dalle espressioni dello spettro elastico  $S_e(T)$  sostituendo  $\eta$  con  $\eta q$ , dove  $q$  è il fattore di struttura. (NTC-08 § 3.2.3.5)

2,811	0,127
2,881	0,121
2,951	0,116
3,021	0,110
3,091	0,105
3,161	0,101
3,231	0,097
3,301	0,092
3,371	0,089
3,441	0,085
3,511	0,082
3,580	0,079
3,650	0,076
3,720	0,073
3,790	0,070
3,860	0,068
3,930	0,065
4,000	0,063

La verifica dell' idoneità del programma, l' utilizzo dei risultati da esso ottenuti sono onere e responsabilità esclusiva dell'utente. Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici non potrà essere ritenuto responsabile dei danni risultanti dall' utilizzo dell'.

Fig. 1.31 Tabelle dei parametri e dei punti dello spettro della componente orizzontale e verticale per lo SLV.

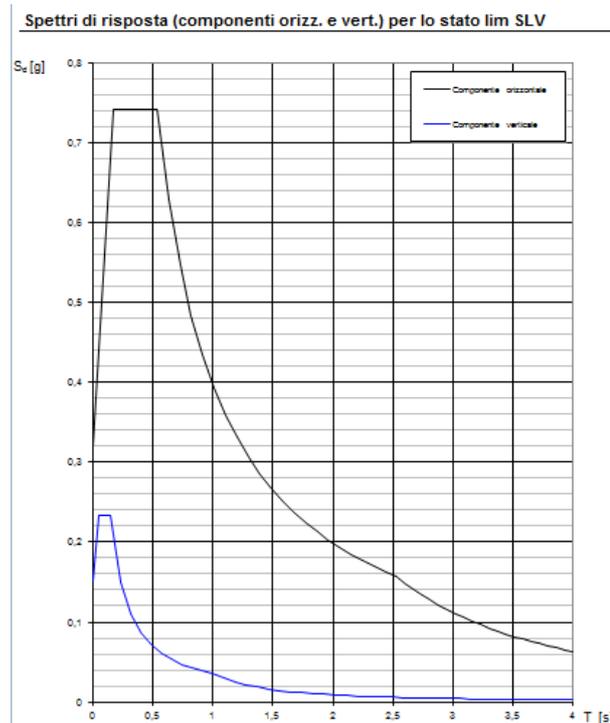


Fig.1.32 Spettri di risposta delle componenti orizzontale e verticale per lo SLV.

## 1.4 Accelerogrammi e parametri del moto sismico

### 1.4.1 Introduzione

L'accelerogramma rappresenta lo strumento più importante per descrivere l'azione sismica ed è alla base delle analisi di stabilità in condizioni dinamiche. Esso consiste nella rappresentazione dell'andamento delle accelerazioni subite dal terreno, a seguito di uno scuotimento sismico, sotto forma di diagramma in funzione del tempo. La scelta mirata degli accelerogrammi è fondamentale per la modellazione accurata e corretta di qualsiasi studio di vulnerabilità sismica e, a seconda del tipo di analisi che si deve effettuare, si disporrà di parametri differenti.

Gli accelerogrammi, in generale si possono dividere in tre grandi categorie:

- I. *Accelerogrammi naturali;*
- II. *Accelerogrammi sintetici spettro-compatibili;*
- III. *Accelerogrammi artificiali*

Gli accelerogrammi appartenenti alla prima categoria vengono definiti naturali perché mantengono i parametri propri del sisma come intensità, magnitudo e distanza dall'epicentro, quelli sintetici invece vengono ricavati a partire dalla risposta di un oscillatore lineare ricavandone gli spostamenti. Infine il terzo gruppo comprende gli accelerogrammi artificiali che derivano dalla modellazione artificiale di eventi di propagazione dei terremoti.

L' utilizzo degli accelerogrammi include un processo di normalizzazione al valore di picco massimo di accelerazione registrato ovvero la *PGA (Peak Ground Acceleration)* che costituisce un importantissimo parametro perché, insieme ad altri parametri, è alla base della costruzione degli spettri di risposta.

In rete sono presenti svariati database su scala nazionale e mondiale da cui è possibile consultare e scaricare registrazioni relative a terremoti storici e recenti, a seconda di vari parametri come accelerazione, velocità e spostamento massimi, distanza, magnitudo

Il fenomeno sismico si descrive in modo tridimensionale, su tre piani:

- NS (piano orizzontale nord-sud),

- WE (piano orizzontale direzioni est-ovest),
- UP (piano verticale direzione up-down) che però trascuriamo.

Per ognuna delle tre direzioni, si riportano diversi parametri di scuotimento come: accelerazione, velocità e spostamento, durata, spettro di risposta e spettro di Fourier.

Al fine di avere chiara la funzione di ogni parametro se ne illustra una breve descrizione.

## 1.4.2 Definizione dei parametri di scuotimento

### 1.4.2.1 Spettro di Fourier

Lo Spettro di Fourier rappresenta la variazione in ampiezza (o le fasi) delle armoniche ricavate dalla trasformata di Fourier, in funzione della frequenza (misurata in Hertz, Hz) o del periodo (in secondi). Può presentarsi a banda limitata o vasta, in relazione al modo in cui si distribuiscono le ampiezze più significative.

I parametri spettrali si ricavano partendo dagli spettri e permettono di ottenere altri parametri fondamentali per la caratterizzazione del moto sismico. Il periodo che corrisponde alla massima ampiezza dello spettro è chiamato *periodo predominante* ( $T_p$ ) mentre è chiamata ampiezza di banda quella dove l'ampiezza dello spettro supera una certa soglia (1/√2 volte la massima ampiezza).

Si riportano in *Appendice A.1* gli Spettri di Fourier degli accelerogrammi presi in considerazione e una tabella riassuntiva dei parametri spettrali. Nella *figura 1.33* si riporta come esempio lo spettro di Fourier (ricavato con il *software Seismosignal*) relativo al primo accelerogramma selezionato per lo studio in esame.

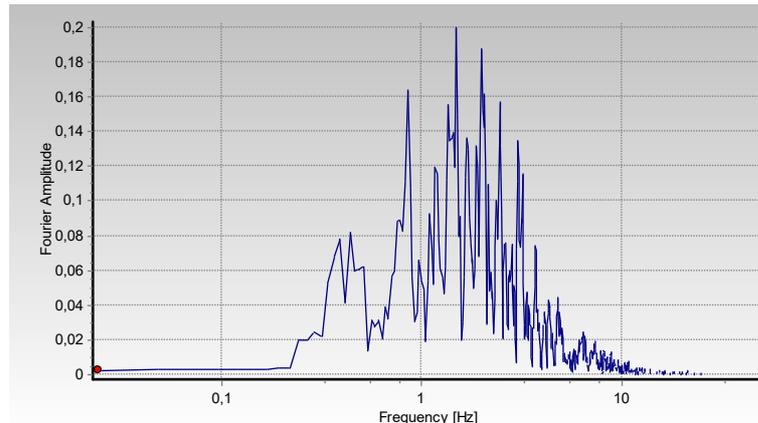


Fig.1.33 Spettro di Fourier delle componenti orizzontale e verticale per lo SLV.

#### 1.4.2.2 Spettro di risposta

Lo spettro di risposta costituisce una rappresentazione indiretta del terremoto ovvero degli effetti che esso ha sulle strutture, quindi mentre lo spettro di Fourier citato precedentemente, descrive il moto sismico in termini di ampiezza e fase, lo spettro di risposta ne valuta le conseguenze. In generale lo spettro di risposta consiste nella rappresentazione delle risposte massime ad un dato terremoto in funzione del periodo  $T$ .

Lo spettro può essere rappresentato in termini di accelerazione, velocità o spostamento.

Nella *fig. 1.34* si può vedere come esempio lo spettro di risposta elastico ricavato per il primo accelerogramma in funzione del parametro di accelerazione. (elaborazione dell'accelerogramma tramite il *software Seismosignal*).

In *Appendice A.1* si riportano gli spettri di risposta ricavati in funzione di tutti e tre i parametri.

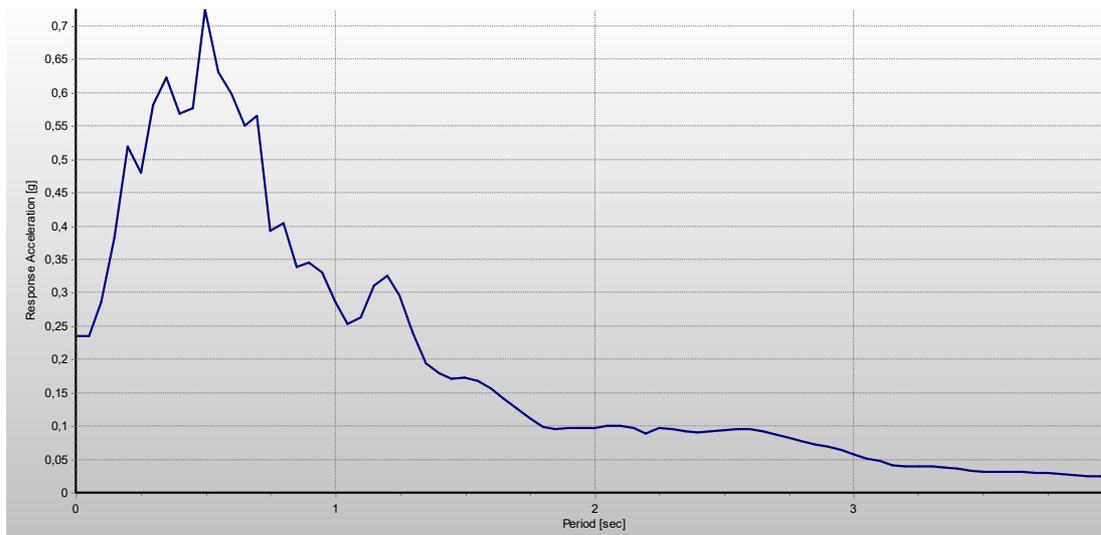


Fig.1.34 Spettro di risposta elastico in funzione dell'accelerazione, ricavato dal primo accelerogramma selezionato.

### 1.4.2.3 Durata

Per durata si intende il tempo necessario per liberare l'energia accumulata lungo la faglia, che aumenta quanto maggiore è l'area interessata alla rottura. La durata del moto sismico è indicata con il termine  $T_d$  e si riferisce alla durata relativa della parte di accelerogramma "strong motion" (ovvero la parte che include la registrazione vera e propria del terremoto, escludendo il rumore di fondo registrato all'inizio dell'evento).

Esistono tre modalità di calcolo della durata:

- come "bracketed duration" ovvero l'intervallo di tempo che intercorre tra il primo e l'ultimo superamento di una soglia di accelerazione (in genere 0,05 g);
- come "durata significativa", che è compresa tra gli istanti al 5% e al 95% in cui è registrata l'energia complessiva;
- come "durata uniforme" se è la somma di tutti gli intervalli che superano la soglia.

La durata introduce un altro importante parametro che è l'intensità di Arias, rappresentante la misura cumulativa del moto sismico durante la sua durata. Dimensionalmente è una velocità (cm/s) e si esprime tramite la funzione intensità del moto:

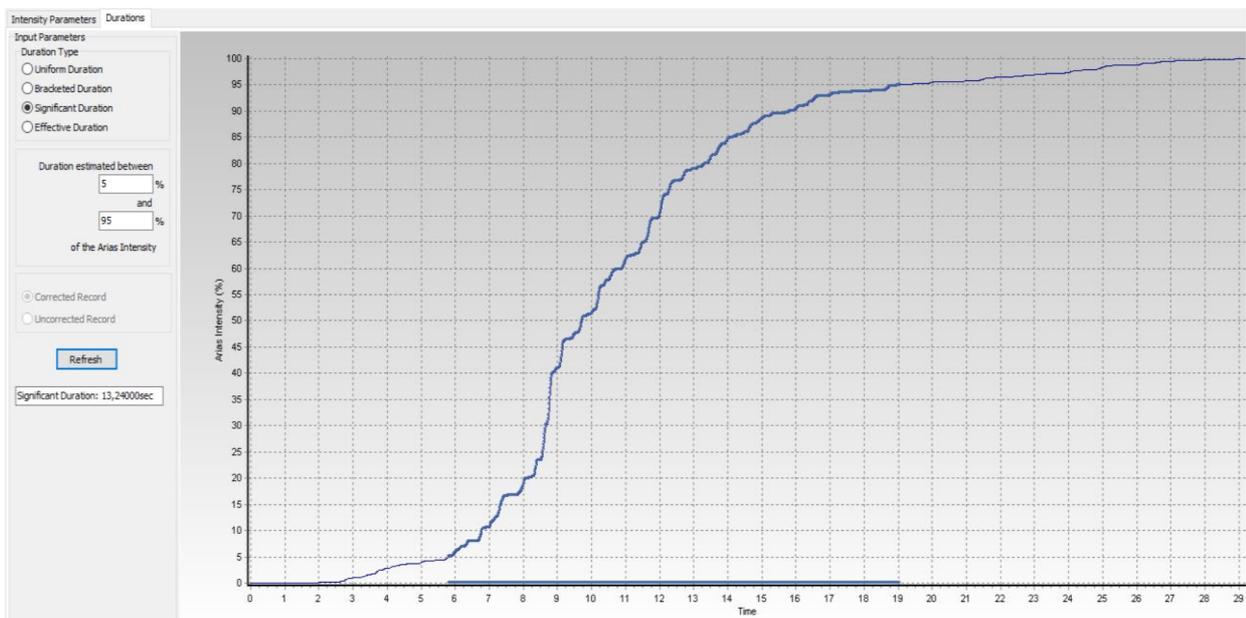
$$I(t) = \frac{\pi}{2g} \int_0^t a^2(\tau) d\tau \quad \text{in cui } a(t) \text{ è l'accelerazione al tempo } t \text{ e } g \text{ l'accelerazione di gravità.}$$

L'intensità di Arias rappresenta il valore massimo della funzione, ovvero:

$I_A = I(T_d)$  dove  $T_d$  è la durata totale dell'accelerogramma.

In *fig 1.35* è illustrata come esempio la durata significativa relativa al primo accelerogramma elaborata e riportata dal *software Seismosignal*.

Si riportano in *Appendice A.1* le durate uniformi e significative dei 3 terremoti.



*Fig.1.35 Durata significativa in funzione dell'intensità di Arias, relativa al primo accelerogramma selezionato.*

#### 1.4.2.4 Accelerazione di picco (PGA):

L'accelerazione di picco PGA (Peak ground Acceleration) indica il picco più alto (in valore assoluto) registrato, da un accelerometro, per l'accelerazione durante un evento sismico. Si registra per due componenti:

- *PGHA* che è la componente orizzontale, è la più importante dal punto di vista ingegneristico perché correlata alle forze dinamiche trasmesse alle strutture dal terremoto
- *PGVA* la componente verticale, meno importante perché in genere è presente più resistenza alle sollecitazioni dinamiche verticali a causa della forza di gravità.

In genere maggiore è l'accelerazione di picco, tanto maggiore è la potenza distruttiva dell'evento sismico e di conseguenza i danni alla struttura. Questi ultimi possono essere più limitati se ad una elevata PGA corrisponde un picco di breve durata e alta frequenza.

Il PGA si può misurare in  $(\text{cm}/\text{s}^2)$  o  $(\text{m}/\text{s}^2)$ , anche se più frequentemente il valore è espresso in multipli della accelerazione di gravità  $g$

E' proprio secondo questo parametro, misurato o prevedibile, che il territorio italiano è stato suddiviso nelle 4 zone sismiche descritte nel *paragrafo 1.3.1* (ovvero; zona 1:  $0,25g < PGA \leq 0,35g$ ; zona 2:  $0,15g < PGA \leq 0,25g$ ; zona 3:  $0,05g < PGA \leq 0,15g$ ; zona 4:  $PGA \leq 0,05g$ ).

L'accelerazione di picco trova un legame anche nello spettro di risposta elastico, perché corrisponde al valore di accelerazione spettrale  $S_e(T)$  quando il periodo  $T$  è nullo (l'oscillatore elementare di riferimento, essendo infinitamente rigido, in questo caso ha l'accelerazione che coincide con quella del suolo).

#### **1.4.2.5 Velocità di picco (PGV)**

La velocità di picco (Peak Ground Velocity) corrisponde al valore di massima velocità registrato. Anche in questo caso si hanno due componenti, ma la componente orizzontale è quella di maggiore importanza. La PGV caratterizza l'ampiezza del moto alle frequenze intermedie (strutture dotate di flessibilità e ponti) e può essere correlata al grado di danneggiamento nelle strutture sensibili a queste frequenze e all'intensità macrosismica, ovvero il parametro che quantifica gli effetti (tramite la scala Mercalli) del sisma sull'uomo, sulle strutture e sull'ambiente coinvolti dal terremoto.

#### **1.4.2.6 Spostamento di picco o massimo (PGD):**

Lo spostamento di picco massimo (Peak Ground Displacement) è interessante dal punto ingegneristico perché dà informazioni sulla caratterizzazione del terremoto a basse frequenze. Viene ricavato tramite doppia integrazione dell'accelerazione e in certi casi, se l'analisi di calcolo non è precisa, il valore può non essere affidabile.

Le grandezze descritte precedentemente, si possono ricavare inserendo i dati degli accelerogrammi (scaricati dalle banche dati nazionali o a scala mondiale come per esempio, per citarne alcuni, *ITACA*, *Rexel* o *USGS*) nel software *SeismoSignal* che li elabora, restituendo i vari parametri e i diagrammi.

### 1.4.3 Selezione dell'input sismico

Dopo la valutazione della pericolosità sismica (con conseguente analisi della disaggregazione) e la definizione dell'*accelerazione di base di progetto* ( $a_g$ ) definiti nel paragrafo 1.3, il passo successivo per determinare l'input sismico consiste nella selezione dei 7 accelerogrammi spettrocompatibili.

E' stato utilizzato il codice *REXEL* (*Iervolino et al., 2011*)<sup>2</sup> che permette la ricerca di combinazioni di accelerogrammi naturali compatibili con gli spettri in accelerazione delle *Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC'08)*, dell'*Eurocodice 8* o definiti dall'utente.

Anche lo spettro elastico di accelerazione di riferimento al sito viene costruito, dalle indicazioni delle Norme Tecniche *NTC08*, specificando le *coordinate geografiche del sito*, la *categoria di sottosuolo* (A, B, C, D o E), la *categoria topografica* (T1, T2, T3, T4), la "*Vita Nominale*" dell'opera strutturale, la "*Classe d'Uso*" e lo "*Stato Limite*" di interesse.

Il software *REXEL* estrae accelerogrammi di input naturali per applicazioni ingegneristiche da diverse banche dati, come la *banca dati italiana (ITACA)* e quella *europea (ESD)*, utilizzando un'interfaccia in ambiente *Matlab*. In *figura 1.36* è illustrata l'interfaccia iniziale del software, in cui inserire i parametri già identificati nelle precedenti fasi.

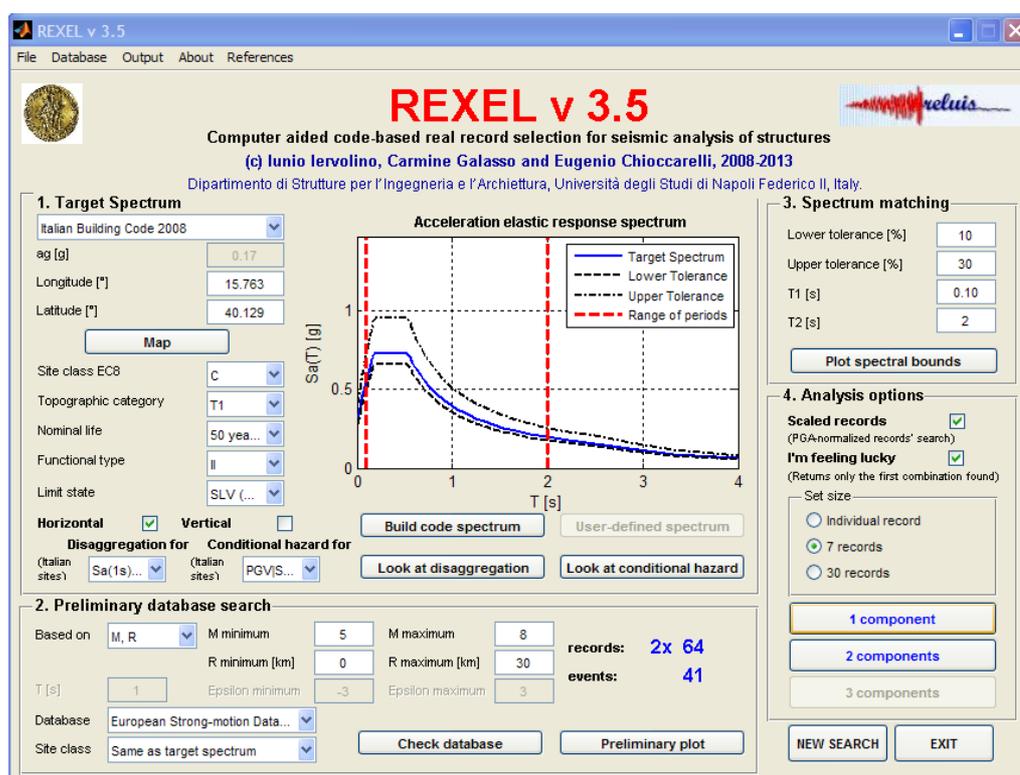


Fig 1.36 Interfaccia iniziale di Rexel in cui inserire tutti i parametri

Il primo passo è stato quello di selezionare “*Italian building code*” nella finestra *Target Spectrum*, poi si sono inserite le coordinate del sito (sistema di riferimento ED50) e i parametri progettuali, tenendo presente di indicare *Site class C* e *Topographic category T1* (topografia pianeggiante).

2 Sviluppato in collaborazione tra INGV, Politecnico *GNGTS 2017* Sessione 2.2 355 di Milano e *consorzio ReLUIs* nell’ambito del progetto della convenzione tra INGV e DPC denominato S4 (2007-2009). REXELite è disponibile al sito della banca dati accelerometrica Europea e Italiana (rispettivamente <http://esm.mi.ingv.it>, ESM, e <http://itaca.mi.ingv.it>, ITACA). Le registrazioni accelerometriche contenute in REXEL sono quelle dell’*European Strong Motion Database (ESD)*, quelle dello *Italian Accelerometric Archive (ITACA)* o del database con records da tutto il mondo: *Selected Input Motions for Displacement-Based Assessment and Design (SIMBAD)*

Si è spuntato su horizontal (la componente orizzontale è in genere la più dannosa) e su *Build code spectrum*. Successivamente si sono inseriti i dati derivanti dall'analisi di disaggregazione (*coppia magnitudo-distanza M and R*). Cliccando su Check database si passa alla fase successiva. Nella fase dopo compare una finestra in cui viene richiesto il numero massimo di combinazioni compatibili da ricercare (ognuna delle quali caratterizzata da 7 accelerogrammi), il massimo fattore di scala medio ed il numero di combinazioni. Gli accelerogrammi sono ricercati tra una tolleranza minima e massima rispetto allo spettro di riferimento. Le *Norme Tecniche* danno una tolleranza minima del 10%, quella massima è stata fissata al 30%.

Concluso il processo di estrapolazione, si possono scaricare i dati e i grafici. I dati ottenuti si sono elaborati tramite il software *Seismosignal* che permette di ricavare i vari diagrammi riguardanti i parametri di scuotimento, per ogni accelerogramma, descritti nel *paragrafo 1.4.2*. Ogni accelerogramma è stato opportunamente scalato all'*accelerazione di base del sito di progetto*  $a_g=0,233$  g. Si riportano nelle tabelle sottostanti i parametri estrapolati da *Rexel* riguardanti il set di accelerogrammi selezionati e la loro rappresentazione grafica ottenuta col software *Seismosignal*.

<b>Preliminary database search</b>	
<b>M min</b>	5
<b>M max</b>	8
<b>R min [km]</b>	0
<b>R max [km]</b>	30
<b>Database</b>	European Strong-motion Database
<b>Spectrum matching parameters and analysis option</b>	
<b>Linf[%]</b>	10
<b>Lsup[%]</b>	30
<b>T1 [s]</b>	0,1
<b>T2 [s]</b>	2
<b>Target Spectrum</b>	
<b>Lon. [°]</b>	15.763
<b>Lat. [°]</b>	40.129
<b>EC8 Site class</b>	C
<b>Top. cat.</b>	T1
<b>Vn</b>	50 years
<b>CU</b>	II

Tab 1.3 Dati inseriti nell' interfaccia iniziale di *Rexel*

Earthquake Name	Mw	Fault	Ep. Dist. [km]	PGA [m/s <sup>2</sup> ]	PGA [g]	PGV [cm/s]	Ia [m/s]
Adana	6.3	strike slip	30	2,644	0,270	20,32	1,006
Friuli	6	thrust	9	0,932	0,095	11,18	0,12
Alkion	6.6	normal	19	2,838	0,290	22,71	0,888
Umbria Marche	6	normal	22	1,041	0,112	11,76	0,218
Alkion	6.3	normal	25	1,176	0,120	14,92	0,224
Chenoua	5.9	thrust	29	2,26	0,231	13,12	0,236
Dinar	6.4	normal	8	3,131	0,319	40,59	1,943

Tab 1.4 Tabella riassuntiva dei parametri relativi ai 7 accelerogrammi

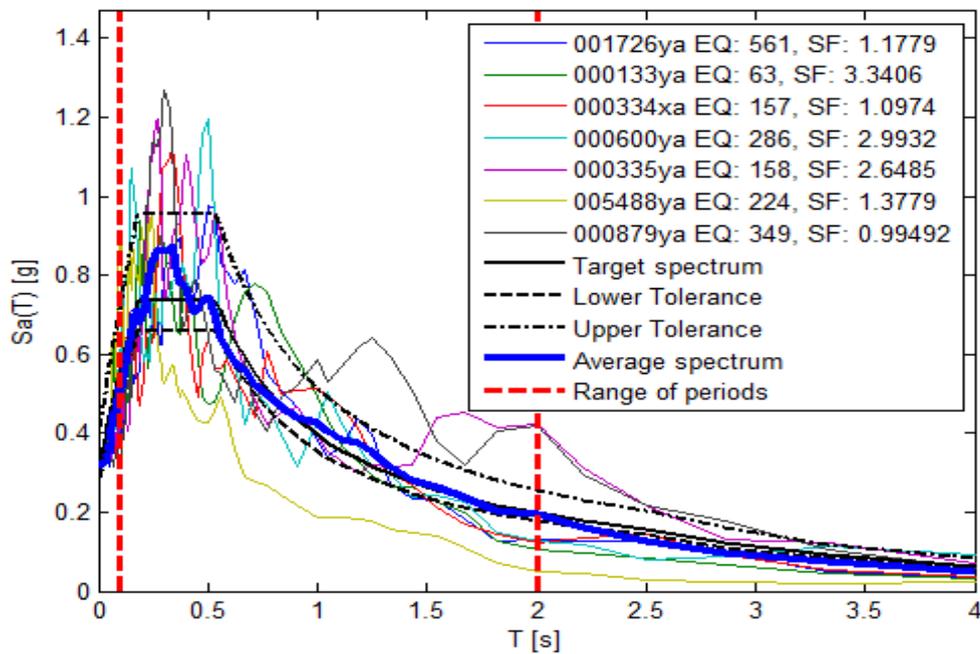
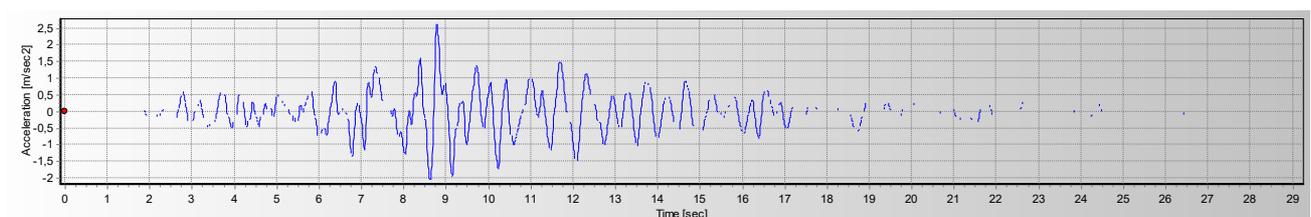
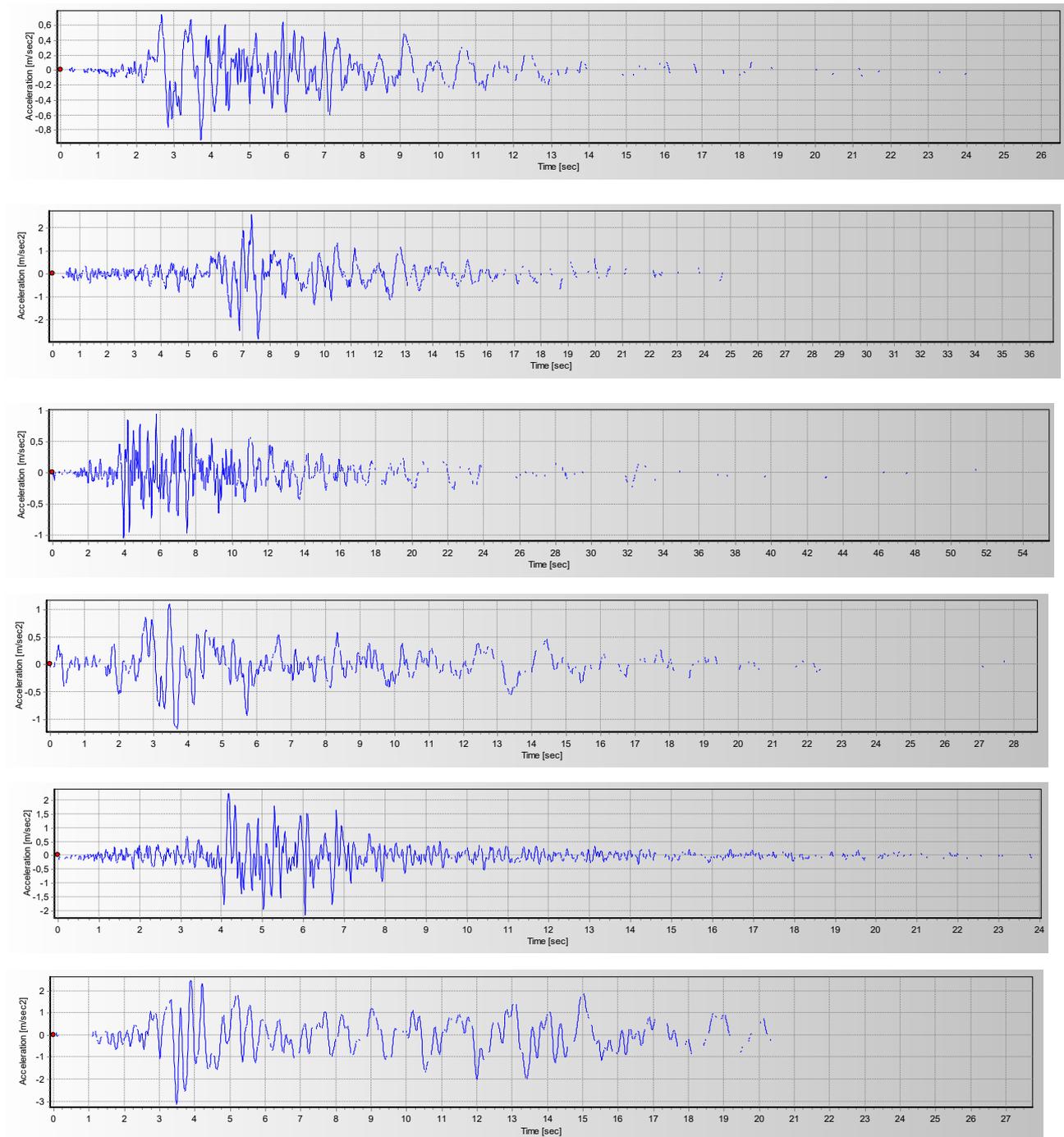


Fig 1.37 Response Spectrum ottenuto dall' analisi tramite rexel

Di seguito si riportano i 7 accelerogrammi elaborati tramite il programma *Seismosignal*, corretti con *Filtro Butterworth* e con la correzione *Baseline*





*Fig. 1.38. Selezione dei 7 accelerogrammi spettro-compatibili per il comune di Lagonegro, elaborati con il software Seismosignal*

In *Appendice A.2* si riportano nel dettaglio i parametri più importanti, relativi ad ogni accelerogramma e in *Appendice A.1* le rappresentazioni grafiche degli altri parametri di scuotimento come *spettri di Fourier*, *spettri di risposta* in funzione di accelerazione e frequenza, *durata significativa* e *uniforme*.

## CAPITOLO 2

### Metodi semplificati per la previsione degli spostamenti

#### 2.1. Introduzione

L'analisi degli spostamenti a seguito di un evento sismico è alla base della valutazione della stabilità di un pendio in condizioni dinamiche.

Come precedente introdotto, questo studio si può compiere tramite vari metodi e se la situazione non è troppo complessa, si può ricorrere a metodi dinamici semplificati. Nonostante il *metodo di Newmark* sia tra quelli di più largo utilizzo, esso presenta comunque alcuni limiti, tra cui la difficoltà e necessità di disporre di procedure di calcolo per l'integrazione delle accelerazioni, sia la forte dipendenza dalla scelta accurata dell'input sismico. Questa scelta può essere difficoltosa a causa dell'influenza di tale metodo dalle proprietà geotecniche, geometriche del pendio e di conseguenza di tutti i parametri. Per fare quindi, un'analisi il più possibile coerente e corretta è preferibile utilizzare accelerogrammi derivanti da terremoti reali invece che registrazioni artificiali, che non darebbero una rappresentazione realistica della sismicità dell'area che si vuole analizzare.

Per ottenere un risultato preliminare dell'ordine di grandezza dello spostamento atteso, si utilizzano relazioni semi-empiriche che mettono in relazione alcuni parametri fondamentali dell'input sismico allo spostamento, con la condizione che tale input provenga da registrazioni che caratterizzino al meglio l'area geografica presa in considerazione e che quindi siano scelte successivamente allo studio di pericolosità sismica del sito (che si è trattato nel *paragrafo 1.3*). Nelle applicazioni pratiche, l'impiego di questi metodi è stato agevolato dal lavoro di vari autori [*Whitman e Liao, 1984; Newmark, 1965; Jibson, 1993 e 2007; Sarma, 1975; Ambraseys e Menu, 1988, etc*] che, tramite l'uso di forme d'onda regolari o integrazione numerica di accelerogrammi corrispondenti a eventi sismici reali, calcolarono gli spostamenti teorici del blocco di Newmark.

Tramite il loro lavoro si è arrivato a ottenere soluzioni semi empiriche con cui è possibile una stima approssimata dello spostamento atteso (valore medio o limite superiore) in funzione dei vari parametri derivanti dall'input sismico.

Nella valutazione delle correlazioni<sup>4</sup> esposte nel *paragrafo 2.3* sono stati considerati i parametri di riferimento del moto sismico che maggiormente influenzano lo spostamento, ovvero:

- accelerazione di picco;
- velocità di picco;
- rapporto di accelerazione critica;
- intensità di Arias;
- magnitudo;
- periodo medio.

## 2.2. Metodo di Newmark

A differenza dei metodi pseudostatici, come già accennato nel *paragrafo 1.2*, l'approccio di Newmark (1965) e dei metodi dinamici semplificati, supera i limiti dovuti al fatto di considerare le forze sismiche, che sono per natura cicliche e transitorie, tramite forze statiche costanti. In questo caso si considera, infatti, l'intera storia temporale dell'evento sotto forma di accelerogrammi. Gli accelerogrammi riportano il terremoto sotto forma di funzioni temporali, e devono essere rappresentativi dell'area interessata allo studio.

La reazione del pendio in condizioni dinamiche si valuta sotto forma di spostamenti accumulati tramite una procedura di doppia integrazione (nel dominio del tempo) della storia di accelerazioni e quindi del moto relativo della massa interessata all'analisi di stabilità.

---

<sup>4</sup> Attività svolta dall'Unità di Ricerca dell'Università degli Studi di Firenze ha avuto come obiettivo la messa a punto di correlazioni, calibrate su eventi strong-motion occorsi in Italia, per la stima dello spostamento del blocco di Newmark in funzione dei principali parametri dell'accelerogramma di progetto.

Tali valori di spostamento vengono confrontati con valori di riferimento, a seconda degli stati limite che si decidono di analizzare (SLU, SLD).

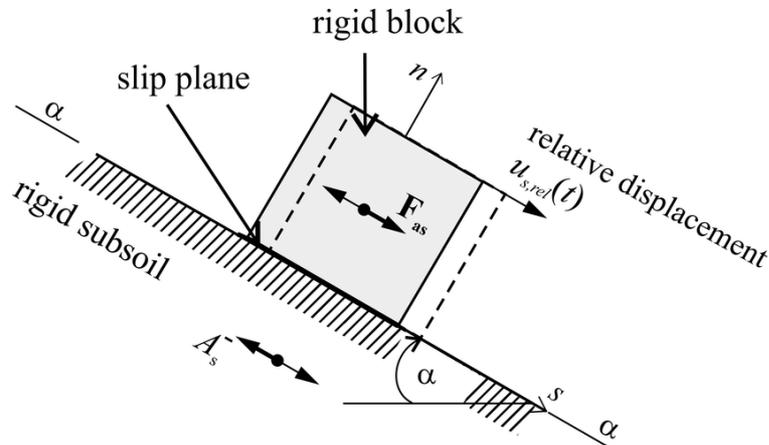


Fig. 2.1 Sistema di forze a cui è soggetto il blocco rigido di Newmark

Questo metodo si basa su diverse ipotesi che riguardano la geometria del pendio, il movimento del blocco, l'accelerogramma di riferimento e la resistenza al taglio, nello specifico:

- Il moto del blocco ha inizio quando l'accelerazione orizzontale supera il valore critico  $a_c$  (ricavato a priori in modo da ottenere un *fattore di sicurezza*  $FS=1$ ).

Al ritorno dell'accelerazione del terreno ad un valore inferiore a quello critico, il moto continua con accelerazione nulla, finché la velocità relativa, per effetto dell'attrito tra blocco e pendio, torna uguale a zero;

- il pendio è assunto come un blocco rigido che scorre su un piano inclinato e soggetto al sistema di forze mostrato in *fig.2.1*;
- la resistenza al taglio del terreno rimane la medesima, sia in condizioni statiche che dinamiche è la stessa ( $a_c$  costante nel tempo);
- l'accelerogramma di progetto viene applicato all'intero corpo di frana ( $a(t)$  costante nello spazio);

Le accelerazioni  $a(t)$  e  $a_c$  si considerano nella componente orizzontale perché l'entità di quella verticale è trascurabile. In *figura 2.2* è mostrato il procedimento con il quale viene valutato lo spostamento. Gli spostamenti cumulati si calcolano tramite doppia integrazione rispetto al tempo dell'accelerazione e ogni intervallo di integrazione parte dall'istante in cui

l'accelerazione supera  $a_c$ . Questo valore di accelerazione critica o limite, termina quando la velocità relativa tra piano di scivolamento e blocco diventa pari a zero, annullandosi. La somma del numero di volte in cui l'accelerazione di base supera quella critica darà lo spostamento finale, che sarà tanto grande quanto maggiore è l'intervallo in cui avviene il superamento di  $a_c$ . Il metodo ha una forte dipendenza dalle caratteristiche della massa instabile, dall'ampiezza e dal contenuto in frequenza dell'azione sismica ed è influenzato dalle caratteristiche dell'accelerogramma, che dovrà quindi essere scelto in modo accurato, dopo uno studio dettagliato dell'area interessata all'analisi.

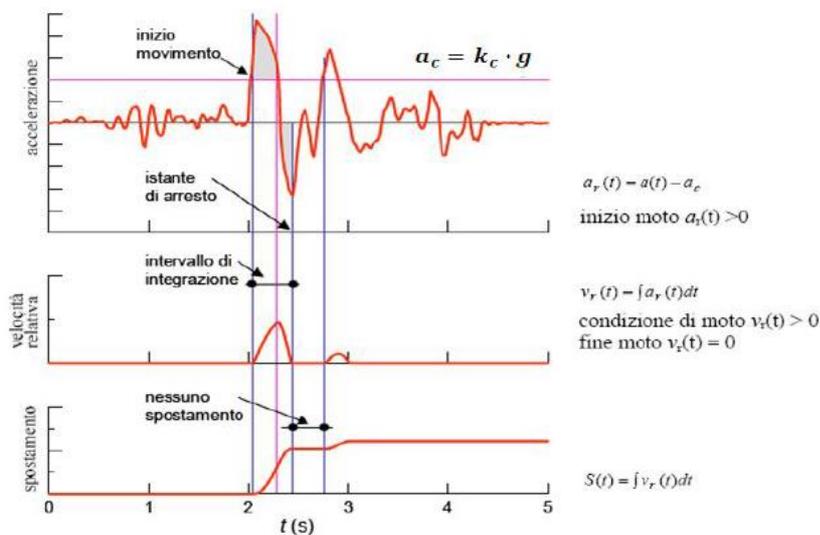


Fig. 2.2 Fasi del moto e calcolo degli spostamenti per doppia integrazione del moto relativo

Le condizioni di moto considerate sono:

- Moto incipiente ( $\ddot{x}'' = 0$ ;  $k_c = k_h$ ):

$$W \cos \alpha - k_c W \sin \alpha = N_1 \quad (2.1)$$

$$W \sin \alpha - k_c W \cos \alpha = C + N_1 \tan \varphi \quad (2.2)$$

- Superamento accelerazione critica ( $k_h(t) > k_c$ )

$$W \cos \alpha - k_h W \sin \alpha = N_2 - W \frac{\ddot{x}}{g} \sin \varphi \quad (2.3)$$

$$W \sin \alpha - k_h W \cos \alpha = C + N_2 \tan \varphi + W \frac{\ddot{x}}{g} \cos \varphi \quad (2.4)$$

Nel modello originario di Newmark, il coefficiente sismico critico  $k_c$  e l'accelerogramma di progetto sono assunti rispettivamente costanti nel tempo e nello spazio; si trascurano inoltre, i fenomeni di amplificazione e il decadimento della resistenza al taglio in condizioni cicliche.

## 2.3. Correlazioni tra parametri del moto sismico e spostamenti attesi del blocco di Newmark

Nel presente paragrafo, si presentano le correlazioni tra parametri del moto sismico e spostamenti attesi del blocco di Newmark su piano orizzontale. Si è fatto riferimento agli studi di cui si è occupata l'Unità di Ricerca dell'Università degli Studi di Firenze nell'ambito del Progetto esecutivo 2005-2007 (Linea 6.3 - Stabilità dei pendii).

Il calcolo degli spostamenti è stato effettuato, considerando i segnali dei principali terremoti registrati sul territorio italiano, mediante una procedura di doppia integrazione numerica [Crespellani et al., 1990], utilizzando registrazioni accelerometriche non scalate e assumendo una accelerazione di soglia,  $a_c = k_c \cdot g$  costante per l'intera durata. L'analisi si è ripetuta per 7 valori prefissati del coefficiente sismico critico,  $k_c$ , pari a 0.002, 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2 e in entrambi i versi dell'accelerogramma, considerando come spostamento finale, il valore maggiore. Le correlazioni vedono i principali parametri di riferimento del moto sismico che più influenzano lo spostamento, come indicato in letteratura da vari Autori [Ambraseys e Menu, 1988; Whitman e Liao, 1984; Jibson, 1993; Sarma et al., 1998],.

Sono stati considerati: accelerazione di picco, velocità di picco, intensità di Arias, periodo medio e alcune loro combinazioni. Lo spostamento è fornito per livelli di confidenza pari al 50% e al 90%.

### 2.3.1. Spostamento del blocco di Newmark - rapporto di accelerazione critica

AMBRASEYS e MENU (1988) hanno elaborato la relazione empirica più semplice e facilmente utilizzabile che lega lo spostamento  $s$  del blocco di Newmark al rapporto di accelerazione critica,  $a_c / a_{max}$ .

#### Dati input:

- Set di dati costituito da 50 registrazioni relative a 11 eventi di terremoti occorsi in varie parti del mondo, prevalentemente californiani;
- Magnitudo basata sulle onde di superficie variabile in un campo ristretto di valori ( $M_s = 6.9 \div 0.3$ );

- Range  $0.1 < a_c/a_{max} < 0.9$ , con riferimento al *valor medio* (ovvero ad una probabilità del 50% di superamento dello spostamento stimato). ), da cui si sono ricavati i valori dei coefficienti della regressione A e B.

Procedura:

Le regressioni sono state elaborate:

- limitatamente all'intervallo di valori del rapporto di accelerazione critica assunto da [AMBRASEYS e MENU, 1988] ovvero  $0.1 < a_c/a_{max} < 0.9$  (formulazione originale);
- sia considerando l'intero set di dati, per il quale  $0.005 a_c/a_{max} < 1$ ;

ed inoltre:

- le equazioni proposte sono state analizzate per un livello di confidenza del 50% e per un livello di confidenza del 90%;
- si è operato sull'intero set di dati, prescindendo dalla distinzione per categoria di terreno perchè ritenuta ininfluyente;
- s è in cm.

Formulazione:

- Formulazione originale :

$$\log s = B_{1a} + A_{1a} \cdot \frac{a_c}{a_{max}} \quad (2.5)$$

- Relazione che soddisfa le condizioni  $a_c/a_{max}=0$  (s tendente all'infinito) e  $a_c/a_{max}=1$  (s pari a zero):

$$\log s = C_{1b} + B_{1b} \cdot \log \frac{a_c}{a_{max}} + A_{1b} \cdot \log \left( 1 - \frac{a_c}{a_{max}} \right) \quad (2.6)$$

- Relazioni proposte, rispettivamente nella forma espressa dalle equazioni (2.5) e (2.6), per un livello di confidenza del 50%:

$$\log s = 1,096 - 3,739 \cdot \frac{a_c}{a_{max}} \quad (2.7)$$

$$\log s = -0,217 - 0,857 \cdot \log \frac{a_c}{a_{max}} + 2,260 \cdot \log \left( 1 - \frac{a_c}{a_{max}} \right) \quad (2.8)$$

- per un livello di confidenza del 90%:

$$\log s = 1,761 - 3,739 \cdot \frac{a_c}{a_{max}} \quad (2.9)$$

$$\log s = -0,418 - 0,857 \cdot \log \frac{a_c}{a_{\max}} + 2,260 \cdot \log \left(1 - \frac{a_c}{a_{\max}}\right) \quad (2.10)$$

**Risultato:**

- Migliore regressione:

$$\log s = -0,217 - 0,857 \cdot \log \frac{a_c}{a_{\max}} + 2,260 \cdot \log \left(1 - \frac{a_c}{a_{\max}}\right) \quad (2.11)$$

- Con probabilità di eccedenza del 10%:

$$\log s = -0,418 - 0,857 \cdot \log \frac{a_c}{a_{\max}} + 2,260 \cdot \log \left(1 - \frac{a_c}{a_{\max}}\right) \quad (2.12)$$

- I valori di  $s$  ottenuti applicando le equazioni (2.7) e (2.8) ( $s_{\text{stim}}$ ) sono messi a confronto con i valori dello spostamento del blocco di Newmark calcolati per doppia integrazione numerica dell'equazione differenziale del moto relativo ( $s_{\text{calc}}$ );
- Il confronto, effettuato in un range di valori dello spostamento (0.1÷100 cm), evidenzia un elevato grado di dispersione dello  $s_{\text{stim}}$  rispetto al valore calcolato ed il limite delle relazioni del tipo 1a per  $a_c/a_{\max} = 0$ .

**2.3.2. Spostamento del blocco di Newmark - rapporto di acc. critica -  $pga/pgv^2$**

Una delle relazioni più valide per la stima dello spostamento del blocco di Newmark in funzione del rapporto di accelerazione critica  $a_c/a_{\max}$  e del rapporto  $PGA/PGV^2$  ( $a_{\max}/v_{\max}^2$ ) è quella proposta da WHITMAN e LIAO (1984).

**Dati input:**

- Analisi di regressione sugli spostamenti del blocco di Newmark calcolati da [FRANKLIN e CHANG, 1977] per 169 registrazioni strong motion relative a 27 terremoti e 10 accelerogrammi sintetici, con riferimento al valor medio (ovvero ad una probabilità del 50% di superamento dello spostamento stimato) da cui si sono ricavati i valori dei coefficienti della regressione A e B.

Procedura:

- la formulazione originale non soddisfa le condizioni necessarie per  $a_c/a_{max} = 0$  e  $a_c/a_{max} = 1$ , si è ritenuto quindi opportuno analizzare anche una correlazione che soddisfasse le condizioni;
- Le equazioni proposte sono state analizzate per un livello di confidenza del 50% e per un livello di confidenza del 90%;
- Si è considerato un intero set di dati, prescindendo dalla distinzione per categoria di terreno perchè ritenuta ininfluyente;
- $s$  è in cm.

Formulazione:

- Formulazione originale :

$$s = A_{2a} \cdot \left(\frac{v_{max}^2}{a_{max}}\right) \cdot e^{B_{2a} \frac{a_c}{a_{max}}} \quad (2.13)$$

- Relazione che soddisfa le condizioni  $a_c/a_{max}=0$  ( $s$  tendente all'infinito) e  $a_c/a_{max}=1$  ( $s$  pari a zero):

$$s = A_{2b} \cdot \left(\frac{v_{max}^2}{a_{max}}\right) \cdot \left(1 - \frac{a_c}{a_{max}}\right)^{B_{2b}} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^{C_{2b}} \quad (2.14)$$

- Relazioni proposte, rispettivamente nella forma espressa dalle equazioni (2.13) e (2.14), per un livello di confidenza del 50%:

$$s = 49 \cdot \left(\frac{v_{max}^2}{a_{max}}\right) \cdot e^{-8,5 \cdot \frac{a_c}{a_{max}}} \quad (2.15)$$

$$s = 3,89 \cdot \left(\frac{v_{max}^2}{a_{max}}\right) \cdot \left(1 - \frac{a_c}{a_{max}}\right)^{2,57} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^{-0,69} \quad (2.16)$$

- per un livello di confidenza del 90%:

$$s = 95 \cdot \left(\frac{v_{max}^2}{a_{max}}\right) \cdot e^{-8,5 \cdot \frac{a_c}{a_{max}}} \quad (2.17)$$

$$s = 7,15 \cdot \left(\frac{v_{max}^2}{a_{max}}\right) \cdot \left(1 - \frac{a_c}{a_{max}}\right)^{2,57} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^{-0,69} \quad (2.18)$$

Risultato:

- Migliore regressione:

$$s = 3,89 \cdot \left(\frac{v_{max}^2}{a_{max}}\right) \cdot \left(1 - \frac{a_c}{a_{max}}\right)^{2,57} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^{-0,69} \quad (2.19)$$

- Con probabilità di eccedenza del 10%:

$$s = 7,15 \cdot \left(\frac{v_{\max}^2}{a_{\max}}\right) \cdot \left(1 - \frac{a_c}{a_{\max}}\right)^{2,57} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{\max}}\right)^{-0,69} \quad (2.20)$$

- i valori di  $s$  ottenuti applicando le equazioni (2.15) e (2.16) ( $s_{\text{stim}}$ ) sono messi a confronto con i valori dello spostamento del blocco di Newmark calcolati per doppia integrazione numerica dell'equazione differenziale del moto relativo ( $s_{\text{calc}}$ ).
- Il confronto, , effettuato in un range di valori dello spostamento (0.1÷100 cm), mostrava, nella forma espressa dalle equazioni (2.13) e (2.14), un grado di dispersione di  $s_{\text{stim}}$  rispetto a  $s_{\text{calc}}$  molto inferiore a quello prima osservato per le relazioni (2.7) e (2.8);
- regressione migliore per l'equazione (2.15) rispetto alla (2.14).

### 2.3.3. Spostamento del blocco di Newmark - Int. di Arias - Rapporto di acc. critica

JIBSON (1993) ha analizzato per primo il legame tra spostamento del blocco di Newmark,  $s$ , e intensità di Arias,  $I_a$ , che fornisce una caratterizzazione più completa della storia di accelerazioni, rispetto a parametri puntuali come l'accelerazione massima, la velocità massima, ecc., in quanto tiene conto di tutti i picchi presenti nell'accelerogramma e implicitamente della durata.

#### Dati input:

- Analisi svolte su 11 registrazioni strong-motion per 6 valori di accelerazione critica (0.02, 0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40g). da cui si sono ricavati i valori dei coefficienti A,B,C;
- Su un insieme di 555 registrazioni strong motion relative a 13 terremoti, e per i medesimi valori di  $a_c$ , si sono ottenuti i valori dei coefficienti A,B,C per una seconda formulazione della relazione;
- Recentemente, analizzando i dati relativi a 2270 registrazioni di strong motion di 30 terremoti avvenuti in varie parti del mondo e 5 valori di accelerazione critica (0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40g), [JIBSON, 2007] ha determinato i valori dei coefficienti per la regressione 3b-1.

Procedura:

- Avendo osservato la dipendenza lineare da  $a_c$ , [JIBSON et al., 2000] della formulazione originale, gli autori hanno successivamente modificato la forma della regressione spostamento del blocco di Newmark-intensità di Arias in modo da rendere il modello meno sensibile alle piccole variazioni dell'accelerazione critica;
- Si sono poi determinate le curve medie di regressione tra spostamento del blocco di Newmark (in cm), intensità di Arias (in m/s) e accelerazione critica (in g), (formulazioni 3a-1 e 3b-1), ottenute per il database di terremoti italiani;
- Si è ottenuto un ulteriore miglioramento della regressione tenendo conto anche dell'accelerazione massima mediante la definizione di un modello in cui compare il rapporto di accelerazione critica,  $a_c/a_{max}$ , in una relazione semplificata;
- Si è operato sull'intero set di dati, prescindendo dalla distinzione per categoria di terreno perchè ritenuta ininfluyente;
- $s$  è in cm.

Formulazione:

- Formulazione originale :

$$\log s = C_{3a} + B_{3a} \cdot \frac{a_c}{g} + A_{3a} \cdot \log I_a \quad (2.21)$$

- Relazione meno sensibile alle piccole variazioni dell'accelerazione critica:

$$\log s = C_{3b} + B_{3b} \cdot \log \frac{a_c}{g} + A_{3b} \cdot \log I_a \quad (2.22)$$

- Curve medie di regressione ottenute per il database di terremoti italiani:

$$\log s = 2,382 - 20,864 \cdot \frac{a_c}{g} + 1,371 \cdot \log I_a \quad (2.23)$$

$$\log s = -1,178 - 1,502 \cdot \frac{a_c}{g} + 1,259 \cdot \log I_a \quad (2.24)$$

- Ulteriore regressione:

$$\log s = 2,167 - 13,882 \cdot \frac{a_c}{g} + \left(1,065 + 13,125 \cdot \frac{a_c}{g}\right) \log I_a \quad (2.25)$$

- Formulazione semplice:

$$s = I_a \cdot 10^{B_{3d} + A_{3d} \cdot \frac{a_c}{a_{max}}} \quad (2.26)$$

- Formulazione semplice che soddisfa le condizioni necessarie per  $a_c/a_{max}=0$  ( $s$  tendente all'infinito) e  $a_c/a_{max}=1$  ( $s$  pari a zero):

$$s = A_{3e} \cdot I_a \cdot \left(1 - \frac{a_c}{a_{max}}\right)^{B_{3e}} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^{C_{3e}} \quad (2.27)$$

- rispettivamente nella forma espressa dalle equazioni (2.26) e (2.27), per un livello di confidenza del 50% sono:

$$s = I_a \cdot 10^{0,17 + 3,57 \cdot \frac{a_c}{a_{max}}} \quad (2.28)$$

$$s = 0,156 \cdot I_a \cdot \left(1 - \frac{a_c}{a_{max}}\right)^{2,60} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^{-0,60} \quad (2.29)$$

- per un livello di confidenza del 90%:

$$s = I_a \cdot 10^{0,63 + 3,57 \cdot \frac{a_c}{a_{max}}} \quad (2.30)$$

$$s = 0,469 \cdot I_a \cdot \left(1 - \frac{a_c}{a_{max}}\right)^{2,60} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^{-0,60} \quad (2.31)$$

**Risultato:**

- Migliore regressione:

$$s = 0,156 \cdot I_a \cdot \left(1 - \frac{a_c}{a_{max}}\right)^{2,60} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^{-0,60} \quad (2.32)$$

- Con probabilità di eccedenza del 10%:

$$s = 0,469 \cdot I_a \cdot \left(1 - \frac{a_c}{a_{max}}\right)^{2,60} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^{-0,60} \quad (2.33)$$

- I valori di  $s$  ottenuti applicando le equazioni (2.25) e (2.28) ( $s_{stim}$ ) sono messi a confronto con i valori dello spostamento del blocco di Newmark calcolati per doppia integrazione numerica dell'equazione differenziale del moto relativo ( $s_{calc}$ ).
- Il confronto, effettuato in un range di valori dello spostamento (0.1 ÷ 100cm), evidenziava per le relazioni del tipo (2.25) e (2.28) un grado di dispersione inferiore a quello delle relazioni determinate con i precedenti due metodi.

### 2.3.4. Spostamento del blocco di Newmark - Periodo - Rapporto di acc.critica

L'influenza del periodo medio, calcolato come rapporto tra durata del segnale e semi-somma del numero di incroci con l'asse dei tempi, sullo spostamento del blocco di Newmark è stata ben evidenziata da SARMA (1975).

#### Dati input:

- Si è calcolato lo spostamento  $s$  del blocco di Newmark per un insieme di registrazioni accelerometriche di 4 terremoti e 5 esplosioni nucleari;
- Analisi della relazione tra il rapporto di accelerazione critica,  $a_c/a_{max}$ , e il termine adimensionale  $4s/(a_{max} T^2)$ , dove  $T$  è il periodo medio del segnale sismico;

#### Procedura:

- Calcolo dello spostamento  $s$  del blocco di Newmark per l'insieme di registrazioni usate;
- L'Autore ha analizzato la relazione tra il rapporto di accelerazione critica,  $a_c/a_{max}$ , e il termine adimensionale  $4s/(a_{max} T^2)$ , confrontando i risultati ottenuti per l'insieme di registrazioni considerato con le curve di spostamento relative a segnali rappresentati da singoli impulsi di forma regolare determinate analiticamente;
- Per valori elevati del rapporto di accelerazione critica ( $a_c/a_{max} > 0.5$ ) la curva relativa all'impulso triangolare rappresenta con buona approssimazione l'involuppo superiore degli spostamenti ;
- quella relativa all'impulso sinusoidale rappresenta una stima ragionevole della regressione (valor medio);
- Per valori di per  $a_c/a_{max} < 0.3$  la curva relativa all'impulso rettangolare approssima l'involuppo superiore degli spostamenti, la curva relativa all'impulso triangolare rappresenta una buona stima del valor medio e quella relativa all'impulso sinusoidale è prossima al limite inferiore.
- Con riferimento alla curva limite superiore e alla curva media, [AMBRASEYS e MENU, 1988] e [CAI e BATHURST, 1996], rispettivamente, hanno determinato i valori dei coefficienti A,B,C;

- Ricerca della migliore regressione tra spostamento del blocco di Newmark, periodo medio, accelerazione massima e rapporto di accelerazione critica ;
- $s$  è in cm.

Formulazione:

- Formulazione originale :

$$\log\left(\frac{4s}{a_{\max}T^2}\right) = A_{5a} - B_{5a} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{\max}}\right) \quad (2.34)$$

- La curva media del modello di regressione del tipo 5a-1::

$$\log\left(\frac{4s}{a_{\max}T^2}\right) = 0,776 - 3,316 \cdot \left(\frac{a_c}{a_{\max}}\right) \quad (2.35)$$

- Curva corrispondente ad un livello di confidenza del 90%:

$$\log\left(\frac{4s}{a_{\max}T^2}\right) = 1,166 - 3,316 \cdot \left(\frac{a_c}{a_{\max}}\right) \quad (2.36)$$

- Relazione con migliore regressione tra spostamento del blocco di Newmark, periodo medio, accelerazione massima e rapporto di accelerazione critica, e che soddisfa le condizioni  $a_c/a_{\max}=0$  ( $s$  tendente all'infinito) e  $a_c/a_{\max}=1$  ( $s$  pari a zero):

$$s = A_{5b} \cdot \frac{a_{\max} \cdot T^2}{4} \cdot \left(1 - \frac{a_c}{a_{\max}}\right)^{B_{5b}} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{\max}}\right)^{C_{5b}} \quad (2.37)$$

- per un livello di confidenza del 50%:

$$s = 0,978 \cdot \frac{a_{\max} \cdot T^2}{4} \cdot \left(1 - \frac{a_c}{a_{\max}}\right)^{2,554} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{\max}}\right)^{-0,704} \quad (2.38)$$

- per un livello di confidenza del 90%:

$$s = 1,34 \cdot \frac{a_{\max} \cdot T^2}{4} \cdot \left(1 - \frac{a_c}{a_{\max}}\right)^{2,554} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{\max}}\right)^{-0,704} \quad (2.39)$$

Risultato:

- Migliore regressione:

$$s = 0,978 \cdot \frac{a_{\max} \cdot T^2}{4} \cdot \left(1 - \frac{a_c}{a_{\max}}\right)^{2,554} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{\max}}\right)^{-0,704} \quad (2.40)$$

- Con probabilità di eccedenza del 10%:

$$s = 1,34 \cdot \frac{a_{\max} \cdot T^2}{4} \cdot \left(1 - \frac{a_c}{a_{\max}}\right)^{2,554} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{\max}}\right)^{-0,704} \quad (2.41)$$

- Per l'insieme di segnali sismici analizzato, il valore del coefficiente di determinazione è elevato e i coefficienti ottenuti sono molto prossimi a quelli ottenuti da altri autori per differenti set di dati;
- Il confronto evidenziava che la relazione (2.40) fornisce rispetto alla (2.39) una stima migliore dello spostamento;

## CAPITOLO 3

### Capacità predittiva delle singole formule

#### 3.1. Introduzione

Scopo del presente paragrafo è applicare i metodi semplificati per la previsione degli spostamenti al caso studio in esame e confrontare i risultati, in termini di spostamento.

Nello specifico si farà un confronto tra gli spostamenti ottenuti con le formule semplificate citate nel *paragrafo 2.3* e quelli ottenuti, partendo dal *metodo di Newmark*, per doppia integrazione numerica degli accelerogrammi selezionati con i criteri esposti nel *paragrafo 2.2*. Verranno descritte le procedure analitiche usate, con accenno ai software utilizzati ai fini dell'analisi. In appendice si riportano nel dettaglio le tabelle con i calcoli svolti, e tutti i grafici.

#### 3.2. Spostamenti ottenuti con le formule semplificate

##### 3.2.1 Riferimenti normativi e parametri di progetto considerati per il sito di interesse

La normativa a cui si fa riferimento sono le *Norme Tecniche per le Costruzioni - NTC08 (D.M. 14.01.2008)*, nello specifico il paragrafo 3.2.3 riguardante la valutazione delle *azioni sismiche di progetto*.

Le grandezze considerate utili ai fini dell'analisi sono state:

- accelerazione massima attesa al sito di riferimento,  $a_{max}$ :

$$a_{max} = a_g \times S_s \times S_T = a_g \times S \quad (3.1)$$

- spostamento orizzontale massimo del terreno,  $d_{max}$

$$d_{max} = 0,025 \times a_g \times S \times T_C \times T_D \quad (3.2)$$

- velocità orizzontale massima del terreno,  $v_{max}$ :

$$v_{max} = 0,16 \times a_g \times S \times T_C \quad (3.3)$$

dove  $a_g$ ,  $S$ ,  $T_C$ ,  $T_D$  assumono i valori trattati nel capitolo 1.3.4 con la determinazione dei parametri di progetto, per il sito di interesse, tramite il foglio di calcolo *Spettri-NTC*.

Ed inoltre:

- magnitudo  $M=5,97$  e distanza  $R=8,83$  risultanti dalla disaggregazione della pericolosità sismica trattata nel paragrafo 1.3.3;
- Intensità di Arias calcolata con la *legge di attenuazione*:

$$\ln(I_a) = c_1 + c_2 \times (M - 6) + c_3 \times \ln\left(\frac{M}{6}\right) + c_4 \times \ln\left(\sqrt{R^2 + h^2}\right) + (s_{11} + s_{12}(M - 6)) \times S_c + (s_{21} + s_{22}(M - 6)) \times S_d + f_1 F_N + f_2 F_R \quad (3.4)$$

Table III. Coefficients of empirical equation for Arias intensity.

$c_1$ 2.800	$c_2$ -1.981	$c_3$ 20.72	$c_4$ -1.703	$h$ 8.78	
$s_{11}$ 0.454	$s_{12}$ 0.101	$s_{21}$ 0.479	$s_{22}$ 0.334	$f_1$ -0.166	$f_2$ 0.512

Fig.3.1 Tabella con i coefficienti della legge di attenuazione

CLASSE C	
$S_C$	1
$S_D$	0
NORMAL FAULT	
$F_N$	1
$F_R$	0
DISAGREGGAZIONE	
$M$	5,97
$R$	8,83

Tab.3.1 Tabella con le costanti inserite nella legge di attenuazione riferite al sito in esame

M	R	h	$R^2 + h^2$	$\ln(I_a)$	$I_a$
[-]	[km]	[km]	[km]	[m/s]	[m/s]
5,97	8,83	8,78	155,1	-1,25	0,29

Tab.3.2 Tabella con calcolo dell'Intensità di Arias inserendo i parametri e le costanti definite

Nella seguente tabella si riassumono i parametri di progetto utilizzati e calcolati per il sito di interesse (già trattati nel capitolo 1.3.4).

STATO LIMITE	SLV
<b>PARAMETRI INDIPENDENTI</b>	
$a_g$ [g]	0,233
$S_s$	1,377
$S_T$	1,000
<b>PARAMETRI DIPENDENTI</b>	
$S$	1,377
$T_c$ [s]	0,537
$T_D$ [s]	2,532

Tab.3.3 Tabella con i parametri ricavati per lo stato limite ultimo SLV

$a_{max}$	$a_{max}$	$v_{max}$	$I_a$	$M$
[cm/s <sup>2</sup> ]	[g]	[cm/s]	[m/s]	[-]
314,7	0,321	37,24	0,29	5,97

Tab.3.4 Tabella riassuntiva dei parametri usati nelle formule semplificate

### 3.2.2 Calcolo degli spostamenti con i metodi semplificati

Gli spostamenti sono stati calcolati tramite due modalità; nel primo caso con formule di correlazione proposte da C. Madiari descritte nel *paragrafo 2.3* ed il secondo utilizzando il software con piattaforma Java *SLAMMER-Seismic Land Movement Modeled using Earthquake Records [U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Jibson, R. W., Rathje, E. M., Jibson, M. W., and Lee, Y. W., 2013]* nel quale il calcolo viene fatto automaticamente dal programma dopo aver inserito i dati di input. In *figura 3.2* è riportata l'interfaccia iniziale del *software Slammer* in cui si sono inseriti i parametri di input per il calcolo automatico degli spostamenti. Si sono scelti il metodo di *Jibson* riferito all'intensità di Arias, quelli di *Rathje* correlati ai parametri di rapporto di accelerazione critica, accelerazione e velocità massime e intensità di Arias e magnitudo.

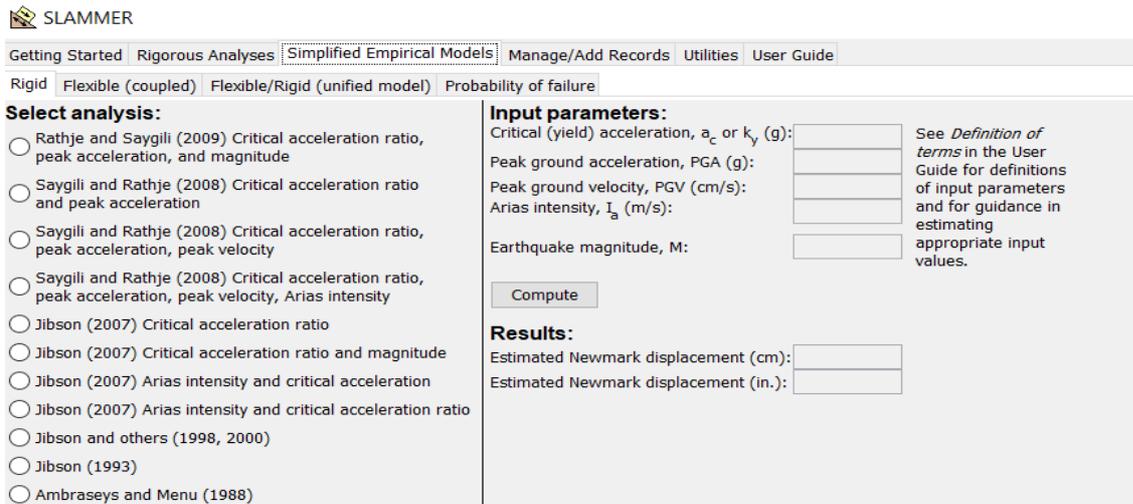


Fig.3.2 Interfaccia del software Slammer in cui inserire i dati di input

Il calcolo degli spostamenti con i vari metodi è stato ripetuto facendo variare il coefficiente sismico  $k_y$ , (preso pari a 0.005, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2) e considerando l'accelerazione critica  $ac = k_y \cdot g$ . Nel seguito si riportano i dati raccolti e tabellati tramite foglio di calcolo Excel ottenuti sia col programma Slammer che con le correlazioni analitiche e messe a confronto.

							SPOSTAMENTI (Madiai)		
							AMBRASEY-MENU	WHITMAN-LIAO	JIBSON
Ky (ac)	amax	amax	vmax	la	M	ac/amax	ac/amax	ac/amax ; Vmax	la
[g]	[cm/s <sup>2</sup> ]	[g]	[cm/s]	[m/s]	[-]	[-]	[cm]	[cm]	[cm]
0,005	314,7	0,321	37,24	0,29	5,97	0,016	20,7	290,7	0,8
0,02	314,7	0,321	37,24	0,29	5,97	0,062	5,7	98,6	0,3
0,05	314,7	0,321	37,24	0,29	5,97	0,156	2,0	40,0	0,1
0,1	314,7	0,321	37,24	0,29	5,97	0,312	0,7	14,7	0,0
0,2	314,7	0,321	37,24	0,29	5,97	0,623	0,1	1,9	0,01

SPOSTAMENTI (SLAMMER)			
RATHJE	RATHJE	JIBSON	RATHJE
ac/amax ; amax ; vmax	ac/amax ; amax ; vmax ; la	la	ac/amax ; amax ; M
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
109,7	36,2	5,3	52,7
83,0	27,0	4,2	39,5
40,7	13,0	2,7	19,2
10,9	3,5	1,2	5,1
1,1	0,3	0,3	0,5

Tab.3.5 Parametri e spostamenti calcolati usando le formule semplificate

Le formule analitiche di regressione usate per ottenere gli spostamenti, elaborate su foglio di calcolo Excel, sono le seguenti:

- **AMBRASEY-MENU:**  $\log s = -0,217 - 0,857 \cdot \log \frac{a_c}{a_{max}} + 2,260 \cdot \log \left(1 - \frac{a_c}{a_{max}}\right)$  (3.5)

- **WHITMAN-LIAO:**  $s = 3,89 \cdot \left(\frac{v_{max}^2}{a_{max}}\right) \cdot \left(1 - \frac{a_c}{a_{max}}\right)^{2,57} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^{-0,69}$  (3.6)

- **JIBSON:**  $s = 0,156 \cdot I_a \cdot \left(1 - \frac{a_c}{a_{max}}\right)^{2,60} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^{-0,60}$  (3.7)

- **RATHJE:**  $\log s = -1,56 - 4,58 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right) - 20,84 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^2 + 44,75 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^3 - 30,50 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^4 -$   
 $- 0,64 \ln a_{max} + 0,64 \ln a_{max} + 1,55 \ln v_{max}$  (3.8)

- **RATHJE (I<sub>a</sub>):**  $\log s = -0,74 - 4,93 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right) - 19,91 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^2 + 43,75 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^3 - 30,12 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^4 -$   
 $- 1,30 \ln a_{max} + 1,04 \ln a_{max} + 0,67 \ln I_a$  (3.9)

- **JIBSON:**  $\log s = 1,460 \ln I_a - 6,642 a_c + 1,546$  (3.10)

- **RATHJE (M):**  $\log s = -4,89 - 4,85 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right) - 19,64 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^2 + 42,49 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^3 - 29,06 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^4 +$   
 $+ 0,72 \ln a_{max} + 0,89 (M - 6)$  (3.11)

In Fig 3.3 si riportano i grafici ottenuti su foglio di lavoro Excel, diagrammando gli spostamenti ottenuti in Tab. 3.5 tenendo fisso il rapporto di accelerazione critica e facendo variare il valore di  $k_y$  pari a 0.005, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2.

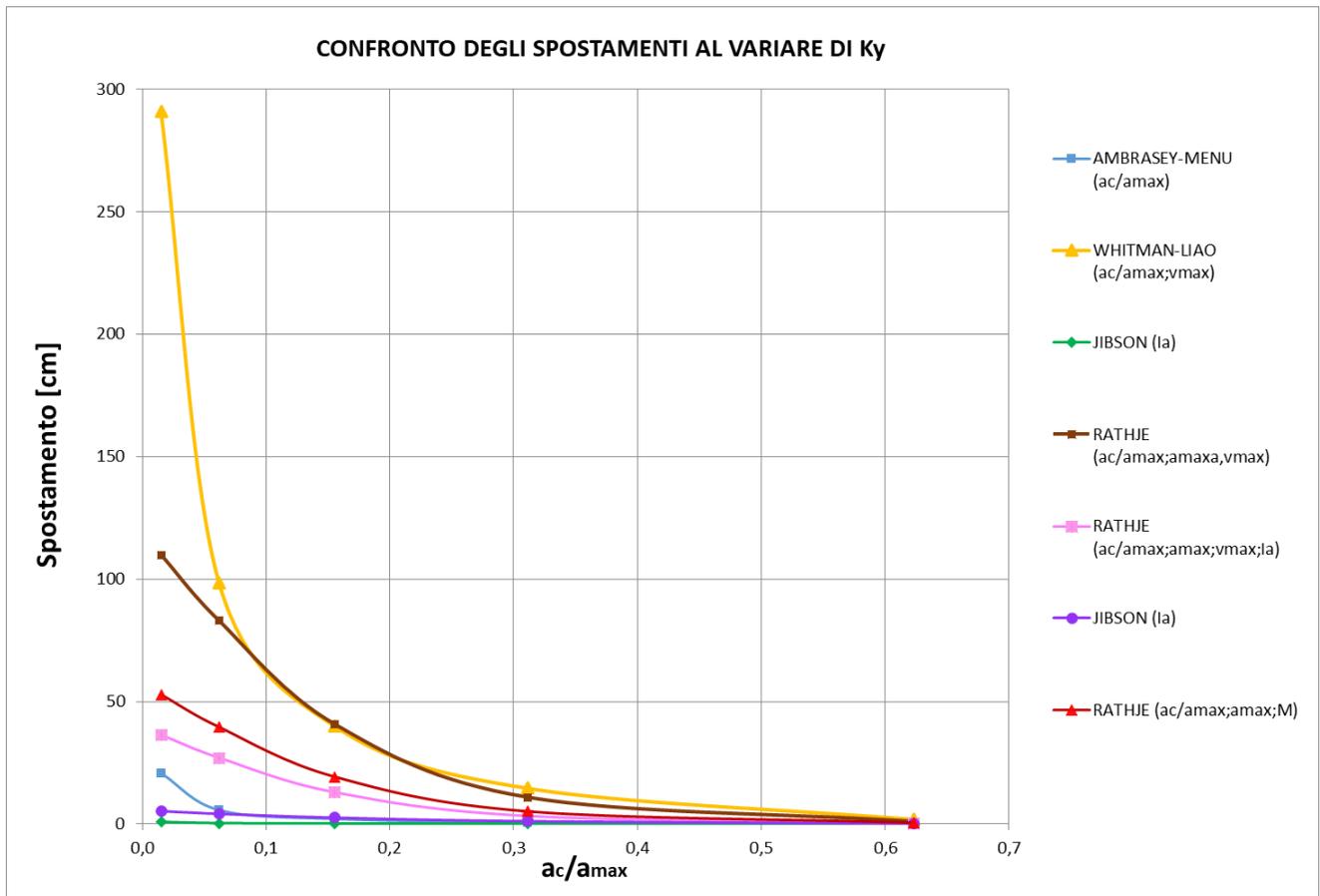


Fig.3.3 Grafico rappresentante il confronto tra i metodi analizzati, in termini di spostamento, al variare di  $K_y$  e di conseguenza del rapporto di accelerazione critica.

Si può notare subito come alcuni metodi stimano uno spostamento molto maggiore di altri. Soprattutto i metodi di *Whitman-Liao* e di *Rathje* che usano i parametri di rapporto di accelerazione critica e velocità massima. I metodi di *Jibson* che invece usano nelle correlazioni l'intensità di Arias tendono a stimare un valore di spostamento più basso. Facendo una prima considerazione dai risultati ottenuti si vede come gli spostamenti siano influenzati dai parametri scelti per le correlazioni, quanto il rapporto di accelerazione critica giochi un ruolo fondamentale nella stima degli spostamenti. Per trarre conclusioni più complete si vedrà il confronto con lo spostamento calcolato per doppia integrazione del moto sismico, che si tratterà nel prossimo paragrafo.

### 3.3 Spostamenti ottenuti per doppia integrazione numerica dell'input sismico

#### 3.3.1 Introduzione

Come già accennato nei paragrafi precedenti, i limiti dei metodi pseudostatici vengono superati dai metodi degli spostamenti, detti metodi dinamici semplificati, che derivano dal modello del blocco rigido di Newmark. In quest'ultimi si considera l'intera storia del sisma sotto forma di accelerogrammi che costituiscono la funzione temporale di input. La reazione del pendio in condizioni dinamiche è valutata sotto forma di spostamenti accumulati tramite una procedura di calcolo automatico per doppia integrazione, nel tempo, della storia di accelerazioni e quindi del moto relativo della massa interessata all'analisi di stabilità.

La condizione limite viene valutata sia allo stato limite ultimo e quindi di collasso, che in termini di perdita di funzionalità (relativo allo stato limite di servizio).

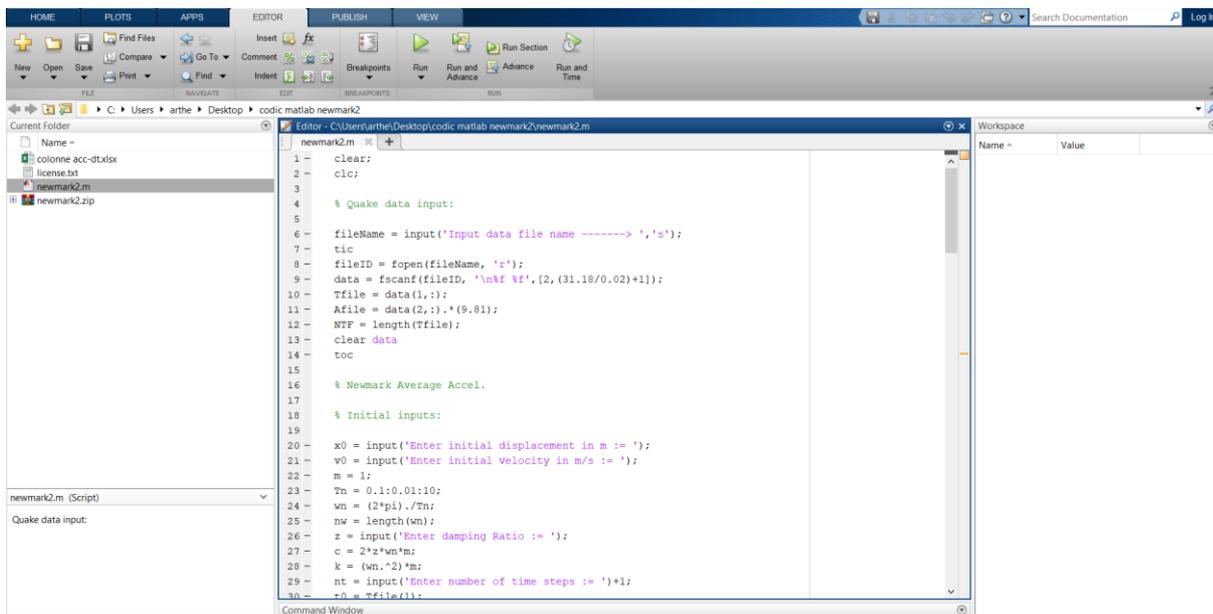
Il blocco instabile si muove sulla superficie di scorrimento ogni volta che l'*accelerazione di base*  $a(t)$  supera quella *critica*  $a_c$  che costituisce un valore limite, di soglia. Quando l'accelerazione cambia segno e annulla la velocità relativa tra terreno e blocco, lo spostamento è pari a zero.

Gli spostamenti cumulati, quindi, si calcolano tramite una procedura di calcolo di doppia integrazione rispetto al tempo dell'accelerazione relativa fra blocco e piano di scivolamento, dove ogni intervallo di integrazione parte dall'istante in cui l'accelerazione supera il valore critico di accelerazione  $a_c$ , che è quello per cui il blocco si trova in condizioni di equilibrio limite. La somma del numero di volte in cui l'accelerazione di base supera quella critica darà lo spostamento finale, che sarà tanto grande quanto maggiore è l'intervallo in cui avviene il superamento di  $a_c$ . E' intuibile una forte dipendenza del metodo sia dalle caratteristiche della corpo in frana, che dall'ampiezza e dal contenuto in frequenza dell'input dinamico.

L'analisi condotta in questo paragrafo tratta il calcolo degli spostamenti per doppia integrazione dell'input sismico costituito dalla scelta dei 7 accelerogrammi spettrocompatibili introdotti nel *paragrafo 1.4.3*, che rappresentano la sismicità del sito di Lagonegro (PZ) in esame.

### 3.3.2 Procedura di calcolo

Data la complessità del calcolo degli spostamenti dalla procedura di doppia integrazione degli accelerogrammi si è usufruito del software *Matlab*. Nello specifico è stata usata una funzione “*Integrators of Newmark Family*” tra quelle reperibili dal sito web *MathWorks.com*, di cui si riporta l’interfaccia all’ avvio di Matlab in *figura 3.4*.



*Fig.3.4 Schermata della funzione usata per la procedura di doppia integrazione degli accelerogrammi, elaborata dal software Matlab*

La funzione suddetta ha elaborato le accelerazioni di ogni accelerogramma, costituenti i dati di input e si sono ottenuti gli spostamenti per doppia integrazione del moto. I dati di accelerazione ricavati dagli accelerogrammi spettrocompatibili (opportunamente e precedentemente scalati al valore della  $a_g$  del sito), sono stati inseriti sotto forma di celle ed elaborati restituendo velocità e spostamento. Il valore dell’accelerazione limite è stato fatto variare e inserito manualmente ad ogni avvio dell’analisi per i 7 accelerogrammi.

Il programma ha svolto il calcolo di doppia integrazione, per ciascun valore di  $k_c$ , in entrambi i versi dell’accelerogramma. Lo spostamento (in cm) risultato in uscita, corrisponde al maggiore tra i due valori calcolati dal software (nei due versi dell’accelerogrammi).

Dall'analisi di calcolo automatico si sono potuti estrapolare anche i diagrammi e le tabelle con i dati elaborati. In appendice si riportano le varie tabelle e i grafici corrispondenti.

In *Tab. 3.6* sono mostrati i parametri principali riferiti ai 7 accelerogrammi selezionati, rappresentativi della sismicità del sito di Lagonegro (PZ), come trattato nel paragrafo 1.4.3. In *Appendice A.2* si riportano i dati completi riferiti agli accelerogrammi.

Earthquake Name	Mw	Fault	Ep. Dist. [km]	PGA [m/s <sup>2</sup> ]	PGA [g]	PGV [cm/s]	Ia [m/s]
Adana	6.3	strike slip	30	2,644	0,270	20,32	1,006
Friuli	6	thrust	9	0,932	0,095	11,18	0,120
Alkion	6.6	normal	19	2,838	0,290	22,71	0,888
Umbria Marche	6	normal	22	1,041	0,106	11,76	0,218
Alkion	6.3	normal	25	1,176	0,120	14,92	0,224
Chenoua	5.9	thrust	29	2,26	0,231	13,12	0,236
Dinar	6.4	normal	8	3,131	0,319	40,59	1,943

*Tab.3.6 Parametri del moto e spostamenti medi per ogni accelerogramma*

In *tabella 3.7* sono stati riportati i valori di spostamenti calcolati per doppia integrazione facendo variare il coefficiente sismico  $k_y = a_c/g$  e ripetendo l'operazione per ogni accelerogramma. Si è considerata l'accelerazione massima ( $a_{max}$ ) del rapporto di accelerazione critica pari a 0,321 g (come nel capitolo 3.2). In *tabella 3.8* sono evidenziati i valori del rapporto di accelerazione critica, al variare di  $k_y$  e con  $a_{max}$  pari a 0,321 g.

ACCELEROGRAMMA	SPOSTAMENTO (cm)				
	ac=0,005 [g]	ac=0,02 [g]	ac=0,05 [g]	ac=0,1 [g]	ac=0,2 [g]
1	137,39	54,96	16,01	2,73	0,068
2	145,64	43,09	13,7	2,63	0,037
3	123,2	38,43	10,46	2,48	0,071
4	257,43	69,39	15,29	2,78	0,059
5	224,7	91,66	25,42	3,85	0,19
6	41,71	15,9	5,86	1,16	0,036
7	275,36	119,22	28,07	2,86	0,045

*Tab.3.7 Spostamenti calcolati per ogni accelerogramma al variare di  $k_y$  tramite script Matlab*

Ky (ac)	amax	ac/amax
[g]	[g]	[-]
0,005	0,321	0,016
0,02	0,321	0,062
0,05	0,321	0,156
0,1	0,321	0,312
0,2	0,321	0,623

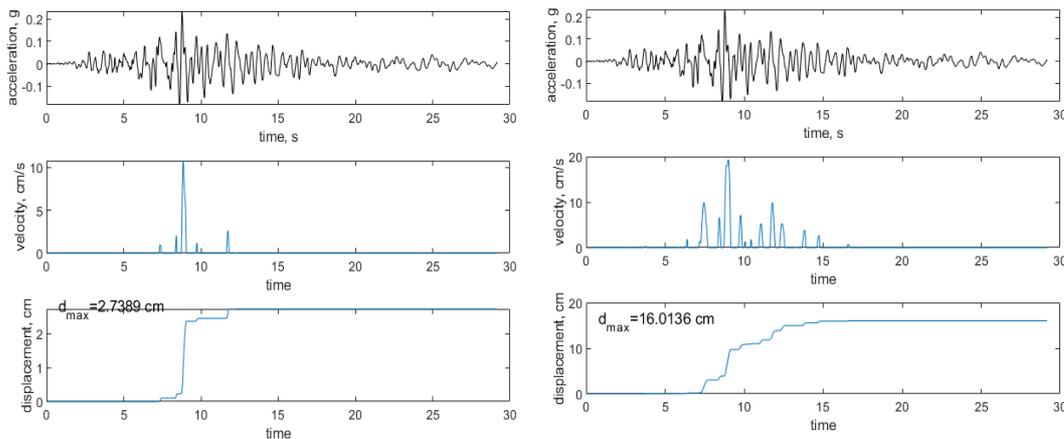
*Tab.3.8 Rapporto di accelerazione critica calcolato al variare di  $K_y$*

Per valori molto bassi dell'accelerazione critica si sono ottenuti spostamenti molto più grandi rispetto a valori alti. Questo avviene poiché la procedura di doppia integrazione somma gli spostamenti ottenuti considerando le accelerazioni che superano quel determinato valore di accelerazione critica.

Ovviamente più basso sarà il valore di  $a_c$  più numerosi saranno gli intervalli di accelerazione da considerare nel calcolo di integrazione (che daranno di conseguenza un valore più alto di spostamento finale). Si illustrano in seguito i diagrammi estrapolati dal *Software Matlab*, rispettivamente in termini di accelerazioni, velocità e spostamenti, in funzione del tempo.

Come esempio si è scelto di riportare, per il primo accelerogramma, in *Fig 3.6* i diagrammi ottenuti con  $a_{lim}=0,1$  e  $a_{lim}=0,05$ .

Lo spostamento riportato, utile per le analisi, è il maggiore tra i due valori calcolati dal software nelle due direzioni dell'accelerogramma.



*Fig.3.5 Esempio di alcuni grafici ricavati da Matlab rappresentanti accelerazione, velocità e spostamento relativi al primo accelerogramma, per  $a_{lim} = 0,1$  e  $a_{lim} = 0,05$*

In *Appendice B.1* si riportano tutti i grafici ottenuti dal software *Matlab* rappresentanti gli spostamenti (i valori sono calcolati dal software per entrambe le direzioni dell'accelerogramma) per ognuno dei 7 accelerogrammi al variare di  $K_y$ .

Come è mostrato in *Fig.3.7*, si è scelto di rappresentare l'andamento degli spostamenti per ognuno dei 7 accelerogrammi spettrocompatibili in funzione del rapporto di accelerazione critica  $a_c/a_{max}$  (con i valori di *Tab 3.8*) e al variare di  $a_{lim}$  a *0.005, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2*.

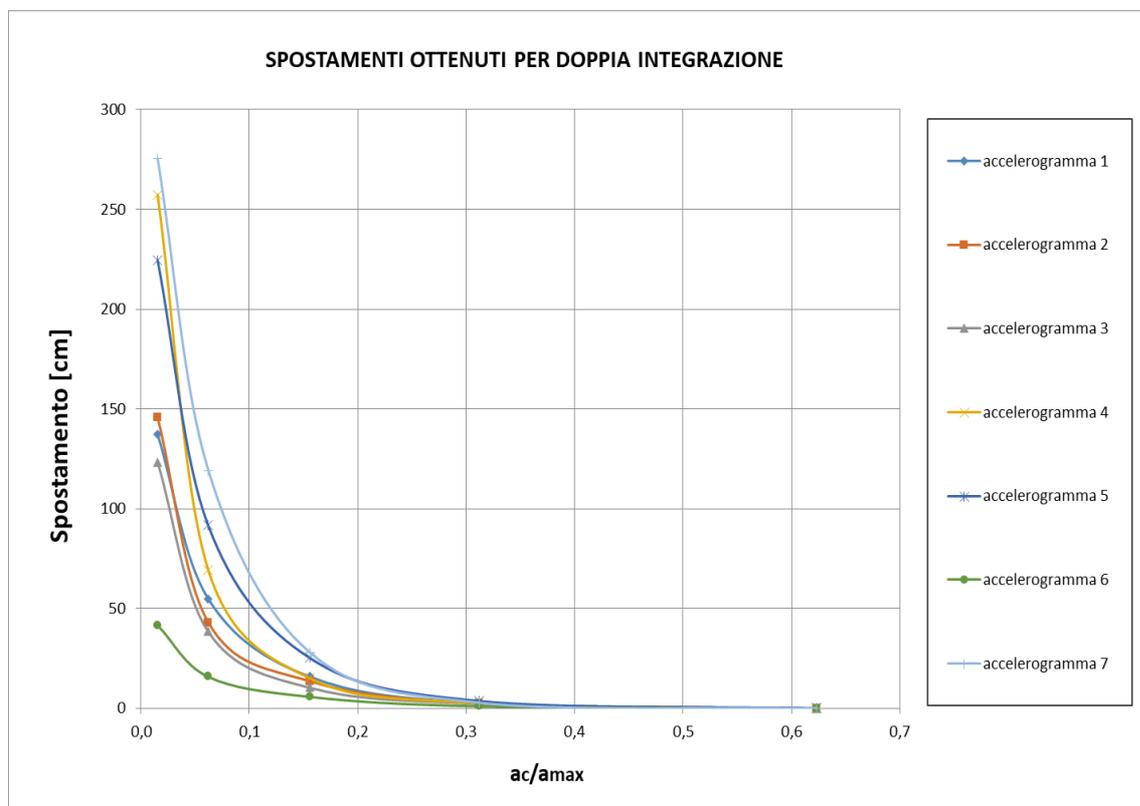


Fig.3.6 Grafico rappresentante l'andamento degli spostamenti al variare di  $K_y$

Si può vedere come, anche in questo caso, gli spostamenti calcolati differiscono, di un termine di grandezza tra loro.

Il quarto accelerogramma è quello ad aver dato il maggior spostamento di circa 250 cm, mentre il sesto, quello minore, pari a poco meno di 50 cm.

Questo conferma il limite della procedura di doppia integrazione del moto sismico, dipendente dalla scelta dell'input sismico di progetto, ovvero la forte sensibilità dei risultati, oltre che dai parametri del moto, anche dalla scelta degli accelerogrammi e di conseguenza dai parametri di input sismico.

## CAPITOLO 4

### Attendibilità dei metodi semplificati

#### 4.1. Introduzione

L'analisi di attendibilità dei metodi considerati si può fare in termini di confronto tra gli spostamenti stimati con i metodi semplificati ( $S_{stim}$ ) e gli spostamenti calcolati per doppia integrazione numerica dell'input sismico ( $S_{calc}$ ). L'interpretazione dei risultati porterà ad una serie di considerazioni e ad evidenziare i parametri chiave delle analisi e quelli di maggiore influenza sui risultati ottenuti.

Allo scopo di mostrare con chiarezza i parametri caratteristici di ogni metodo, si riportano nel seguito le correlazioni analitiche (corrispondenti rispettivamente alla miglior regressione), proposte da vari autori (*Ambraseys-Menu, Whitman-Liao, Jibson, Rathje*), usate per ottenere gli spostamenti ed elaborate su foglio di calcolo Excel (analizzate nel dettaglio *paragrafo 2.3*):

- **AMBRASEY-MENU:**  $\log s = -0,217 - 0,857 \cdot \log \frac{a_c}{a_{max}} + 2,260 \cdot \log \left(1 - \frac{a_c}{a_{max}}\right)$  (4.1)

- **WHITMAN-LIAO:**  $s = 3,89 \cdot \left(\frac{v_{max}^2}{a_{max}}\right) \cdot \left(1 - \frac{a_c}{a_{max}}\right)^{2,57} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^{-0,69}$  (4.2)

- **JIBSON:**  $s = 0,156 \cdot I_a \cdot \left(1 - \frac{a_c}{a_{max}}\right)^{2,60} \cdot \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^{-0,60}$
- **RATHJE:**  $\log s = -1,56 - 4,58 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right) - 20,84 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^2 + 44,75 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^3 - 30,50 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^4 -$   
 $- 0,64 \ln a_{max} + 0,64 \ln a_{max} + 1,55 \ln v_{max}$  (4.3)

- **RATHJE ( $I_a$ ):**  $\log s = -0,74 - 4,93 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right) - 19,91 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^2 + 43,75 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^3 - 30,12 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^4 -$   
 $- 1,30 \ln a_{max} + 1,04 \ln a_{max} + 0,67 \ln I_a$  (4.4)

- **JIBSON:**  $\log s = 1,460 \ln I_a - 6,642 a_c + 1,546$  (4.5)

- **RATHJE (M):**  $\log s = -4,89 - 4,85 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right) - 19,64 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^2 + 42,49 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^3 - 29,06 \left(\frac{a_c}{a_{max}}\right)^4 +$   
 $+ 0,72 \ln a_{max} + 0,89 (M - 6)$  (4.6)

Le correlazioni proposte (da 4.1 a 4.6) consentono di stimare lo spostamento in funzione di vari parametri caratteristici del moto sismico e loro combinazioni, ovvero:

- rapporto di accelerazione critica ( $a_c/a_{max}$ ) (*Ambraseys-Menu*);
- rapporto tra accelerazione massima e velocità massima al quadrato ( $v_{max}^2/a_{max}$ ) e rapporto di accelerazione critica ( $a_c/a_{max}$ ) (*Whitman-Liao*);
- intensità di Arias ( $I_a$ ) e rapporto di accelerazione critica  $a_c/a_{max}$  (*Jibson*);
- rapporto di accelerazione critica ( $a_c/a_{max}$ ), acc. massima ( $a_{max}$ ), intensità di Arias ( $I_a$ ) (*Rathje*);
- intensità di Arias ( $I_a$ ) e accelerazione critica ( $a_c$ ) (*Jibson*);
- magnitudo ( $M$ ), rapporto di accelerazione critica ( $a_c/a_{max}$ ) e acc. massima ( $a_{max}$ ) (*Rathje*).

## 4.2. Attendibilità dei metodi semplificati

In *figura 4.1* sono rappresentati in un unico diagramma gli spostamenti stimati con i metodi semplificati e quelli calcolati per doppia integrazione dei 7 accelerogrammi spettrocompatibili, al variare del *rapporto di accelerazione critica*  $a_c/a_{max}$ .

Si può notare come gli andamenti iperbolici delle due procedure di calcolo sono simili e paragonabili ma anche come alcuni metodi sovrastimino, o sottostimino, lo spostamento rispetto a quello calcolato per doppia integrazione dell'input sismico.

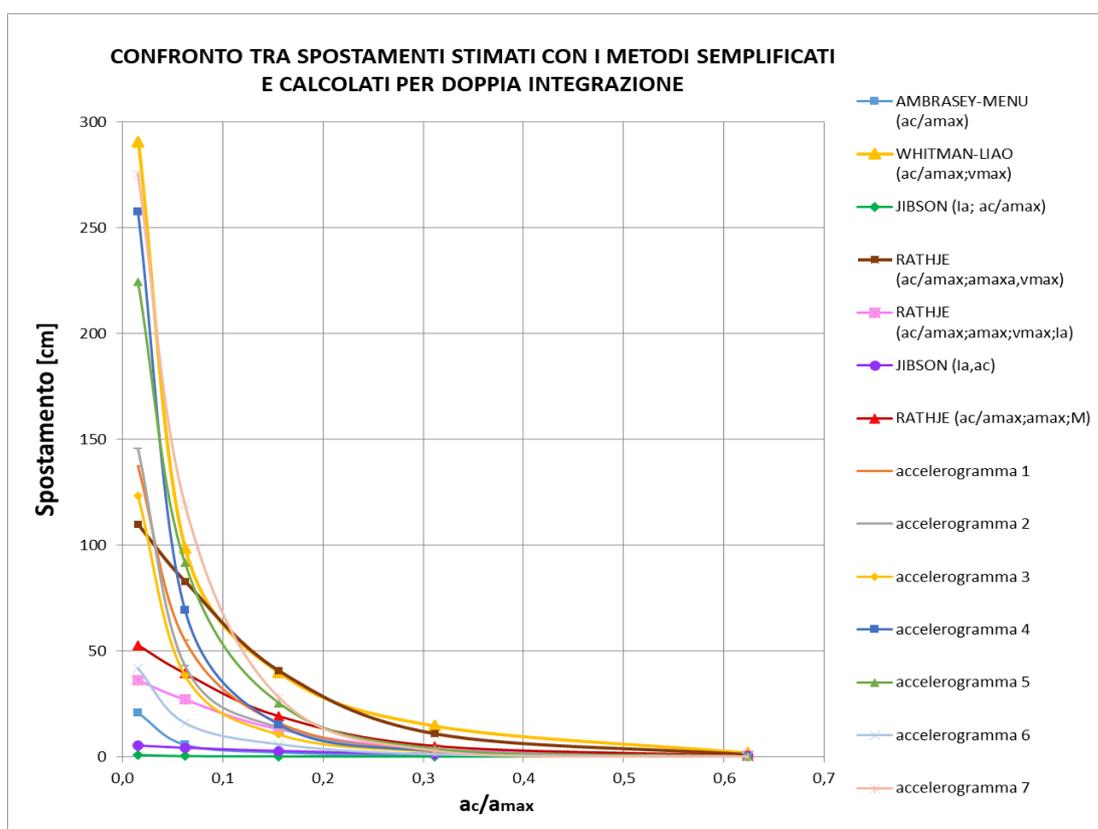


Fig.4.1 Andamento degli spostamenti calcolati e stimati, al variare di  $a_c/a_{max}$

Al fine di poter compiere un confronto più semplice anche dal punto di vista di rappresentazione, si è scelto di riportare in scala logaritmica gli spostamenti calcolati per doppia integrazione e quelli stimati con ogni metodo semplificato considerato (Fig 4.2 - 4.8). Gli spostamenti stimati ( $S_{stim}$ ) con ognuno dei 7 metodi semplificati considerati, proposti dagli autori (Ambraseys-Menu, Whitman-Liao, Jibson, Rathje), è stato confrontato con l'andamento degli spostamenti calcolati per doppia integrazione numerica dell'input sismico ( $S_{calc}$ ), sempre al variare del rapporto di accelerazione critica  $a_c/a_{max}$ .

A seconda dell'andamento ne conseguono considerazioni riguardo l'influenza, più o meno maggiore, sul risultato in termini di spostamento, di determinati parametri del moto sismico che caratterizzano le variabili prese in considerazione da ogni metodo.

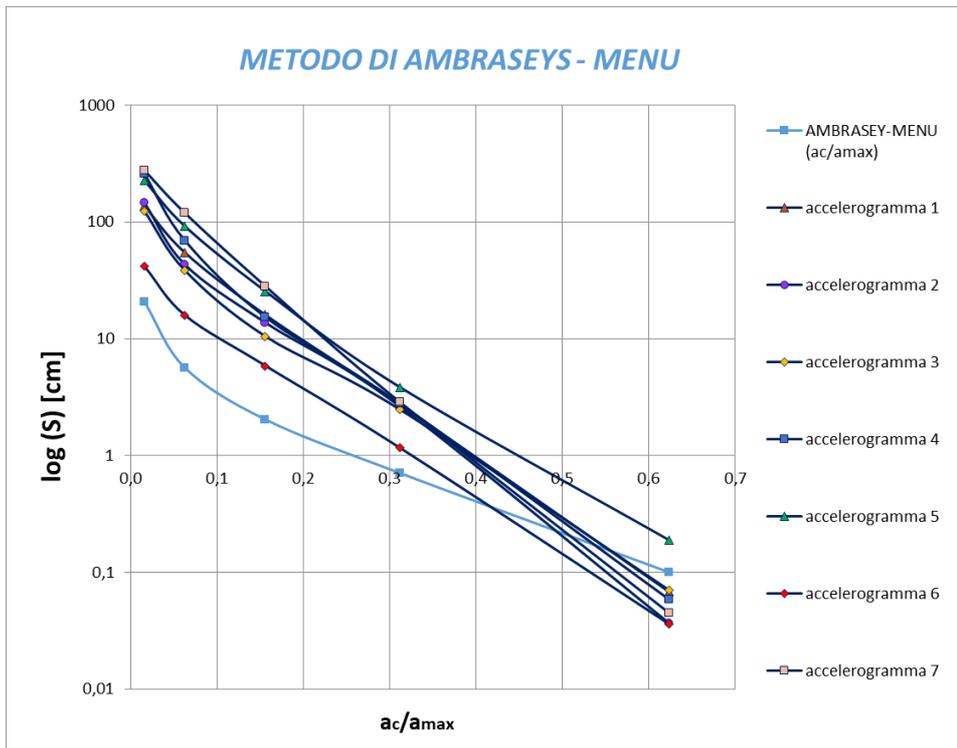


Fig.4.2 Andamento degli spostamenti calcolati e di quelli stimati con il metodo di Ambraseys-Menu, al variare del rapporto di accelerazione critica

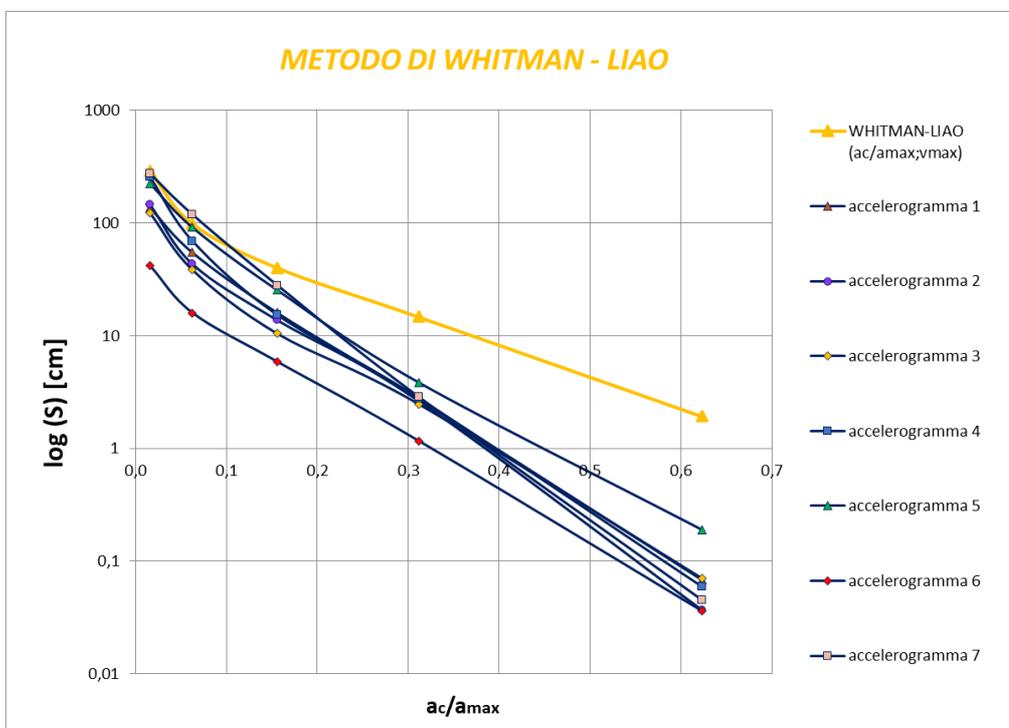


Fig.4.3 Andamento degli spostamenti calcolati e di quelli stimati con il metodo di Whitman-Liao, al variare del rapporto di accelerazione critica

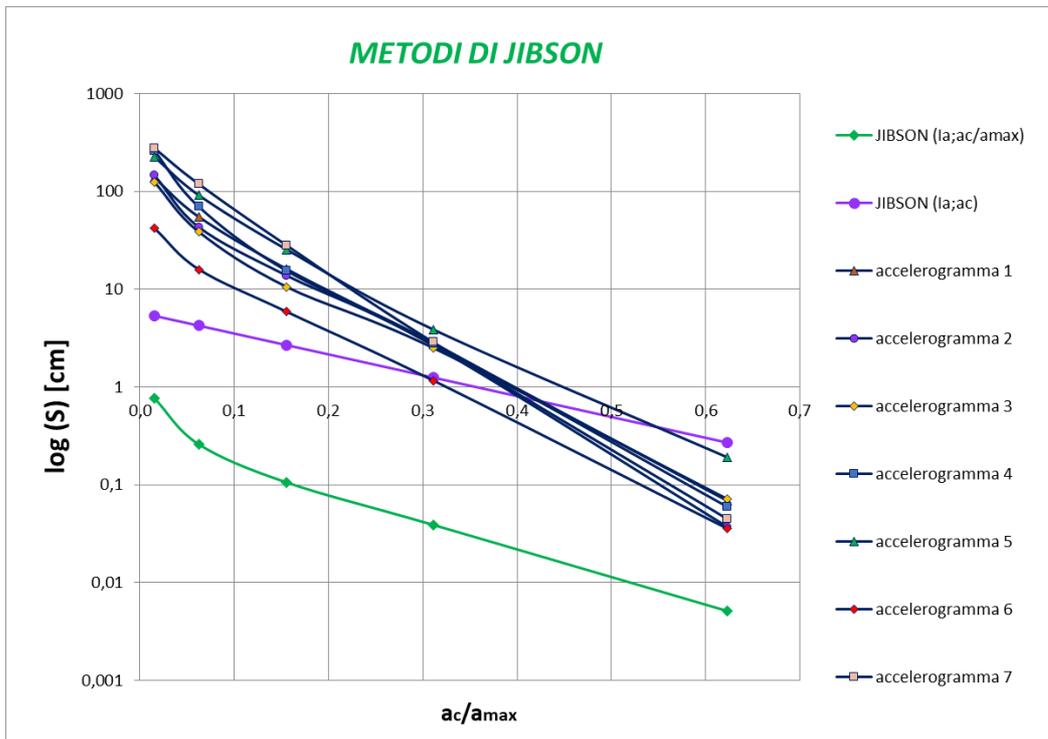


Fig.4.4 Andamento degli spostamenti calcolati e di quelli stimati con i metodi di Jibson, al variare del rapporto di accelerazione critica

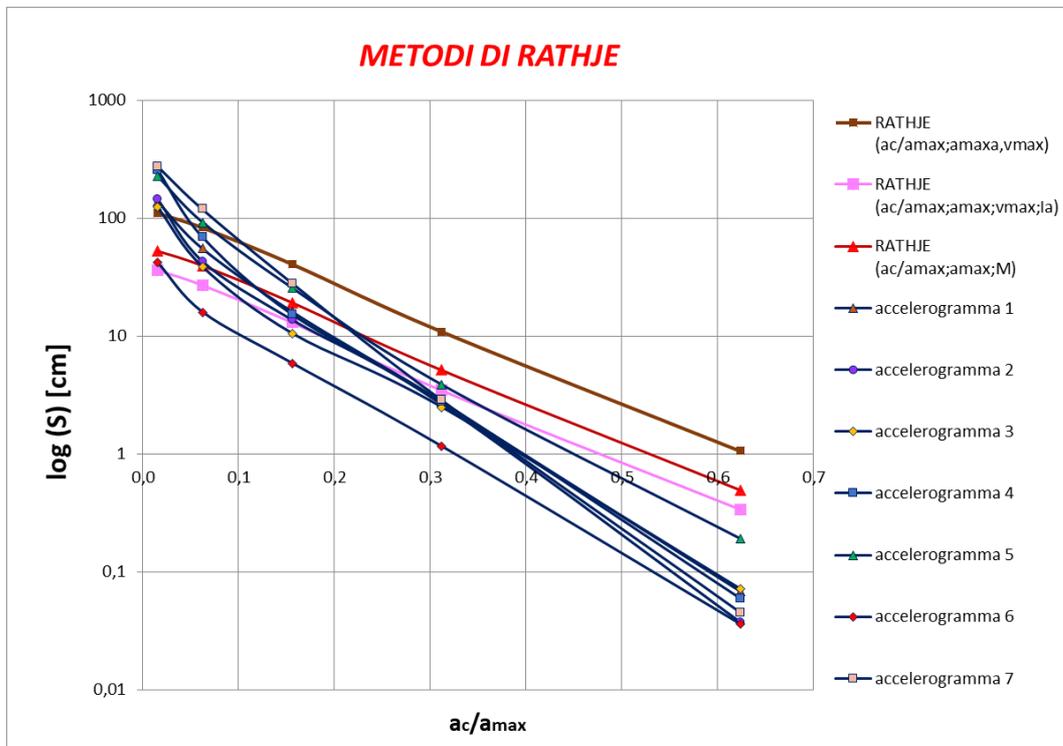


Fig.4.5 Andamento degli spostamenti calcolati e di quelli stimati con i metodi di Rathje, al variare del rapporto di accelerazione critica

Si può notare come il metodo di *Whitman-Liao* (che sia il rapporto di accelerazione critica che la velocità massima) sia quello a cui corrisponde il valore di spostamento più elevato (quasi 300 cm). Questa sovrastima può essere dovuta ad un adattamento non ideale della correlazione per valori di rapporto di accelerazione critica  $a_c/a_{max}$  molto bassi ( $< 0,1$ ).

Il metodo di *Jibson* che considera parametri come l'intensità di Arias ( $I_a$ ) e l'accelerazione critica ( $a_c$ ) ma non il rapporto di accelerazione critica, dà invece valori molto bassi di spostamento, che differiscono di due ordini di grandezza dall'andamento degli spostamenti risultanti dal calcolo per doppia integrazione del moto.

I metodi per cui la stima dello spostamento sembra non scostarsi molto dai valori ottenuti con la procedura di doppia integrazione degli accelerogrammi, sono quello di *Ambraseys- Menu* che considera come variabile il solo rapporto accelerazione critica ( $a_c/a_{max}$ ) e di *Rathje* che integrano anche altri parametri come la magnitudo ( $M$ ), velocità massima ( $V_{max}$ ) e intensità di Arias ( $I_a$ ).

## CONCLUSIONI

Le recenti normative europee (*EC8*) e nazionali (*DM 14/01/2008*) che riguardano le analisi in condizioni sismiche in ambito geotecnico, hanno introdotto metodi di tipo prestazionale, la cui applicazione prescinde dalla valutazione dello spostamento indotto dall'azione sismica di progetto. Per situazioni non particolarmente complesse, tale stima può essere effettuata tramite metodi di analisi dinamica semplificata.

Il presente lavoro ha dimostrato che l'analisi di instabilità dei pendii in zona sismica, svolta con i diversi modelli e metodi di analisi esposti, deve essere condotta tramite previa e accurata scelta dei parametri che definiscono le caratteristiche geologiche e geotecniche del terreno e del sito in analisi, dalla quale ogni metodo è sensibilmente condizionato.

Il rapporto di accelerazione critica si è rivelato un parametro di fondamentale importanza nella stima preliminare del valore di spostamento in condizioni dinamiche.

I metodi semplificati, analizzati, le cui correlazioni includevano il rapporto di accelerazione critica, hanno portato a valori di spostamento stimato che si scostava di poco dal valore di spostamento calcolato per doppia integrazione numerica dell'equazione differenziale del moto relativo. Questo rappresenta un miglioramento delle regressioni tra lo spostamento del blocco di Newmark e gli altri parametri.

I metodi di *Whitman-Liao* e *Ambraseys-Menu* sono risultati i più cautelativi, poiché hanno fatto ottenere un valore di spostamento più elevato e quindi a favore di sicurezza, se considerato come stime preliminare.

I metodi di *Rathje* sono invece stati i più adattabili all'andamento degli spostamenti calcolati per doppia integrazione del segnale sismico mentre quelli di *Jibson* hanno portato a valori di spostamento modesti, soprattutto per bassi valori del rapporto di accelerazione critica, rivelandosi quindi non a favore di sicurezza.

Per quanto riguarda l'affidabilità dei modelli proposti, si deve precisare che le analisi sono state condotte considerando un insieme di segnali, che anche se rappresentativi delle caratteristiche del sito in esame, sono in numero contenuto e relativi ad un'area geografica non estesa.

Ciò ha portato ad un limitato range di variazione dei parametri del moto sismico considerati. Inoltre, non si può non considerare che l'impiego di tali relazioni deve essere effettuato sempre con grande cautela, dato l'elevato grado di dispersione e di incertezza che in genere è associato alla definizione di relazioni empiriche e semi-empiriche.

Si può comunque affermare che, per una stima prestazionale dell'ordine di grandezza dello spostamento atteso, è utile ricorrere all'uso di relazioni semi-empiriche che legano tale grandezza ad alcuni parametri significativi del segnale sismico, a condizione che le correlazioni impiegate siano sufficientemente rappresentative per il sito in cui ricade l'opera in esame.

Pur tenendo presente dei limiti sopracitati, legati all'impiego di correlazioni empiriche e semi-empiriche, si può concludere che le relazioni proposte possono rappresentare, ai fini delle applicazioni pratiche, un valido strumento per la stima preliminare dello spostamento atteso di pendii in condizioni sismiche.

## APPENDICE A

### A.1

Si riportano l'andamento nel tempo di accelerazione, velocità, spostamento e le rappresentazioni grafiche di alcuni parametri di scuotimento come *Spettri di Fourier*, *Spettri di Risposta* in funzione di accelerazione e frequenza, *Durata Significativa e Uniforme*, ricavati dall'elaborazione di ognuno dei 7 accelerogrammi spettrocompatibili, opportunamente scalati, con il Software *Seismosignal*.

#### Accelerogramma 1

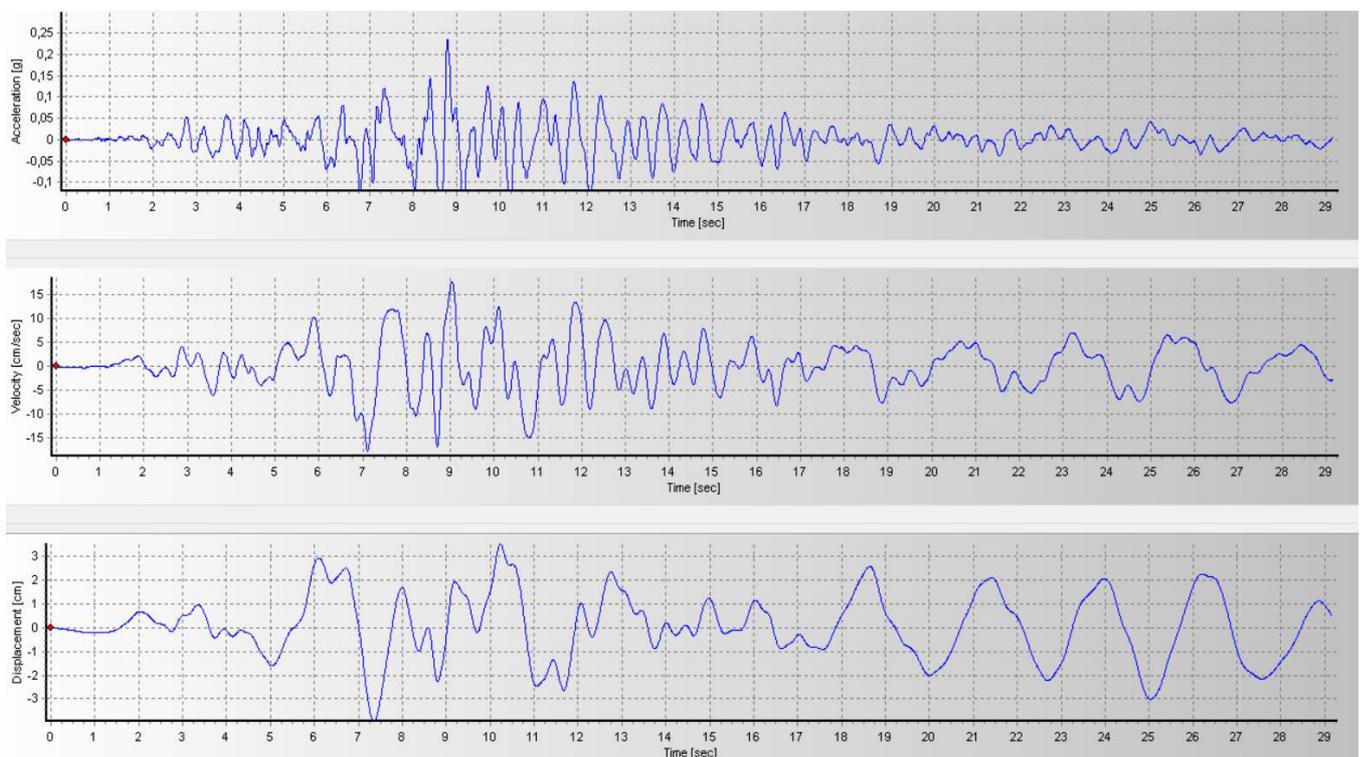


Fig. AP. 1.1. Accelerazione, velocità e spostamento in funzione del tempo, ricavati dal primo accelerogramma selezionato.

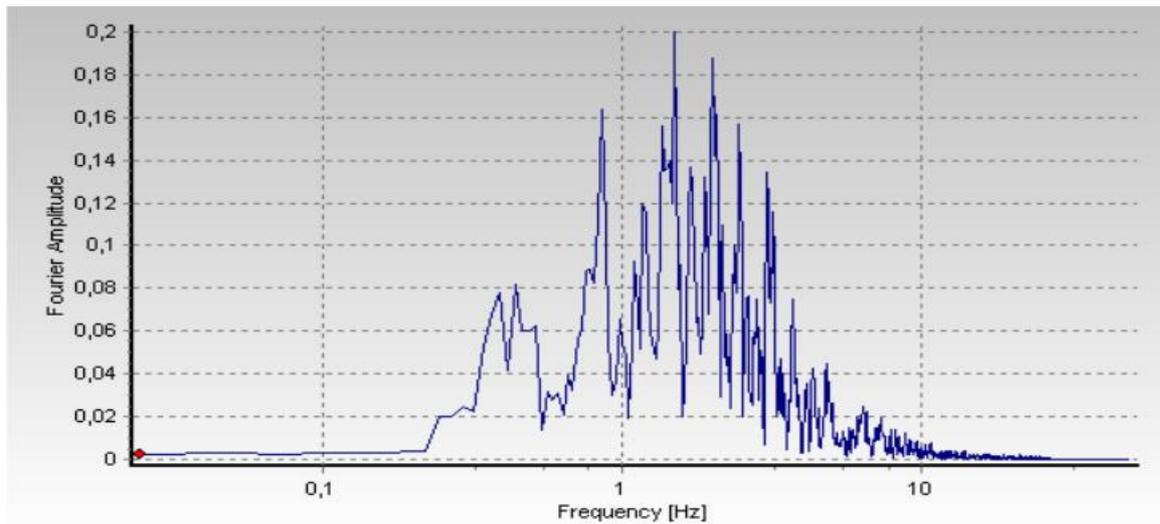


Fig. AP. 1.2. Spettro di Fourier delle componenti orizzontale e verticale per lo SLV.

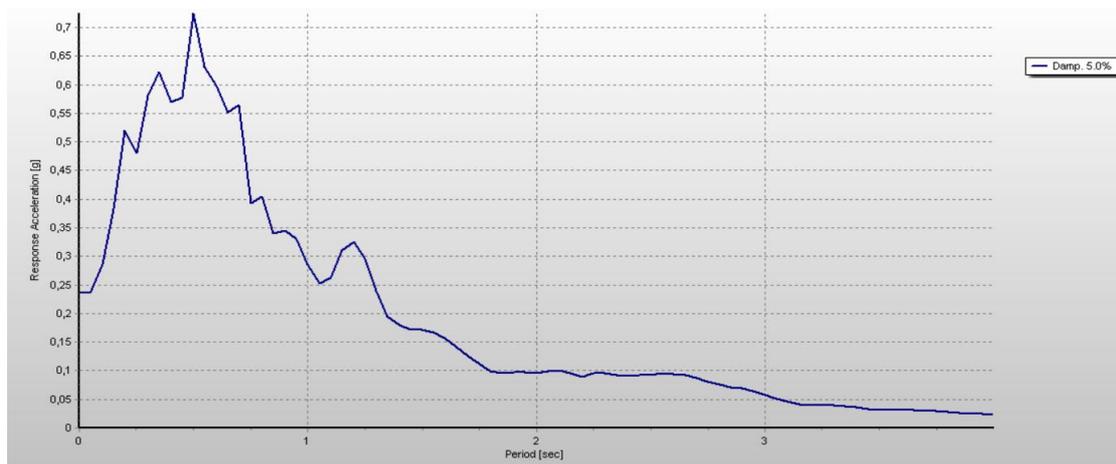


Fig. AP. 1.3. Spettro di risposta elastico in funzione dell'accelerazione, ricavato dal primo accelerogramma selezionato.

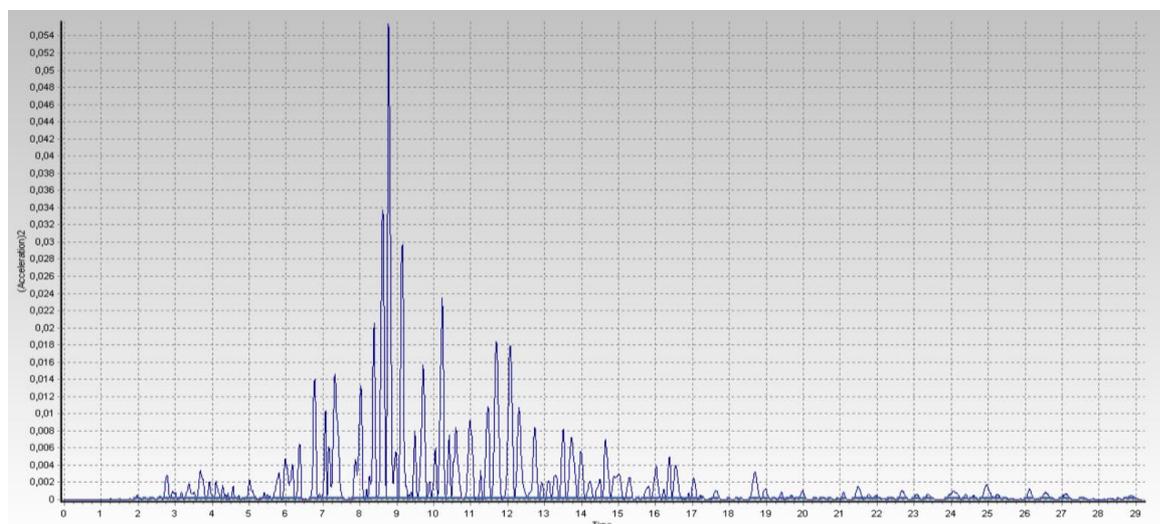
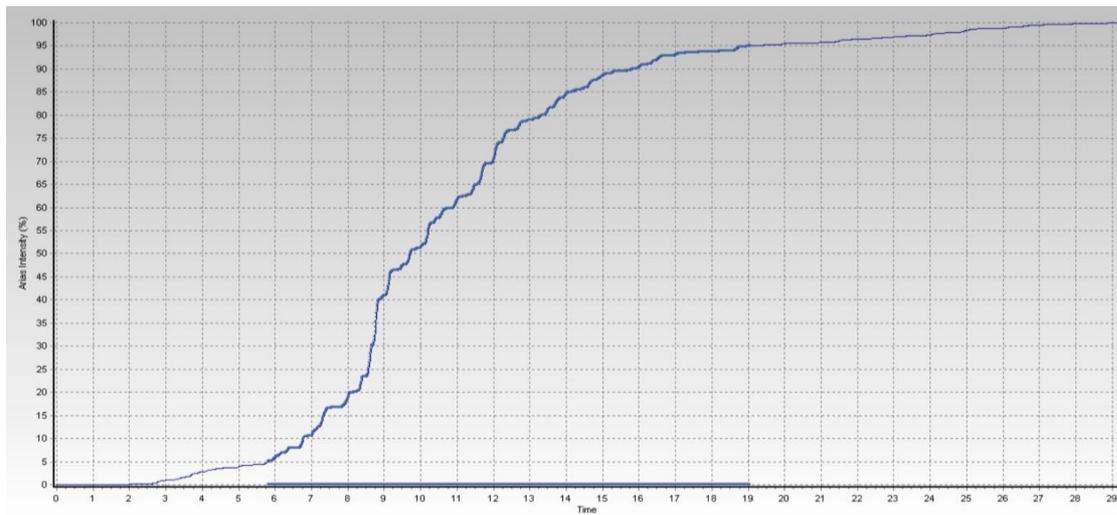
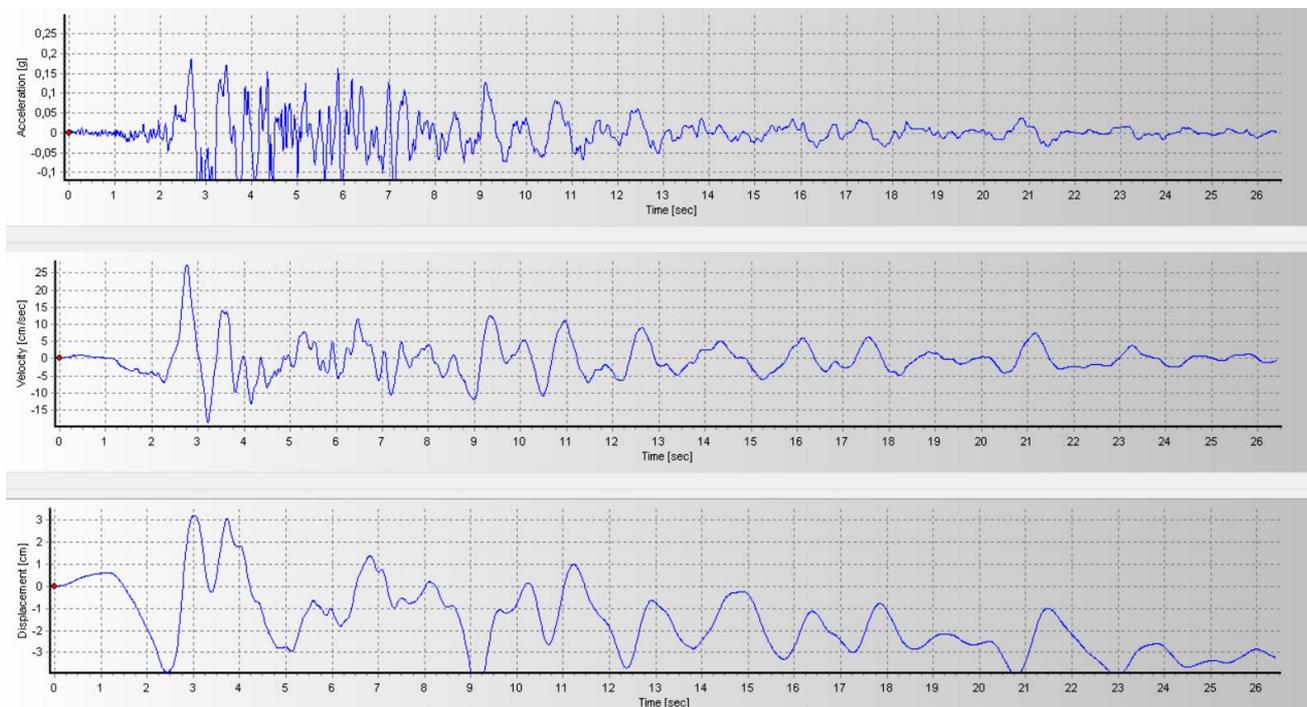


Fig. AP. 1.4. Durata uniforme, relativa al primo accelerogramma selezionato.



*Fig. AP. 1.5. Durata significativa in funzione dell'intensità di Arias, relativa al primo accelerogramma selezionato.*

### Accelerogramma 2



*Fig. AP. 1.6. Accelerazione, velocità e spostamento in funzione del tempo, ricavati dal secondo accelerogramma selezionato.*

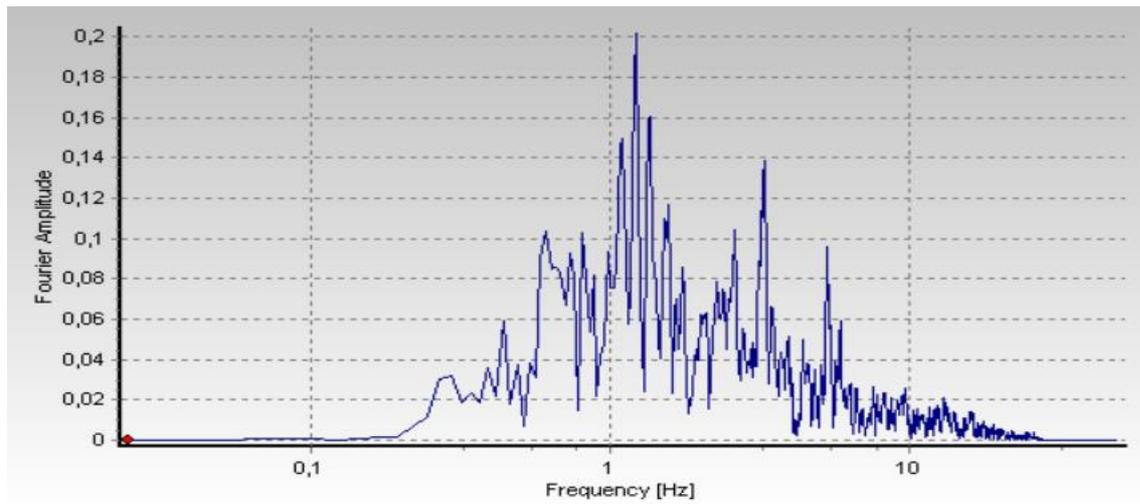


Fig. AP. 1.7. Spettro di Fourier delle componenti orizzontale e verticale per lo SLV.

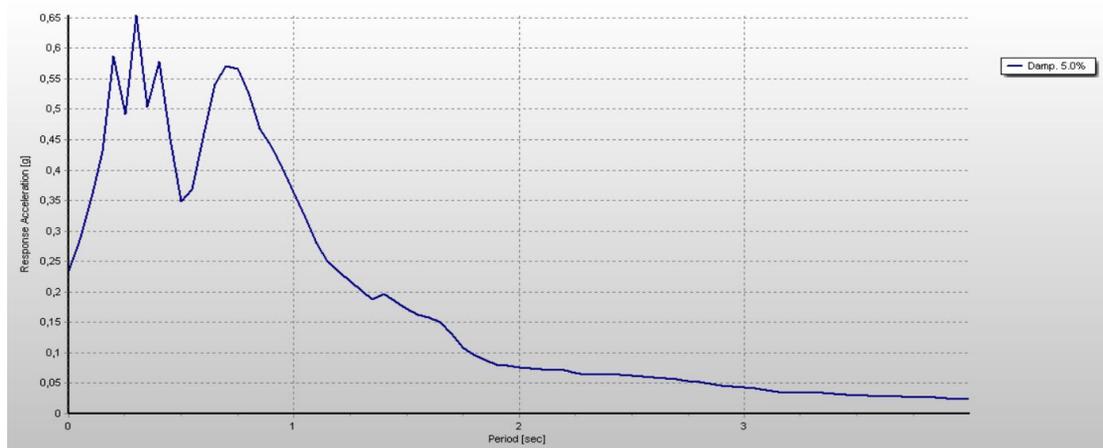


Fig. AP. 1.8. Spettro di risposta elastico in funzione dell'accelerazione, ricavato dal secondo accelerogramma selezionato.

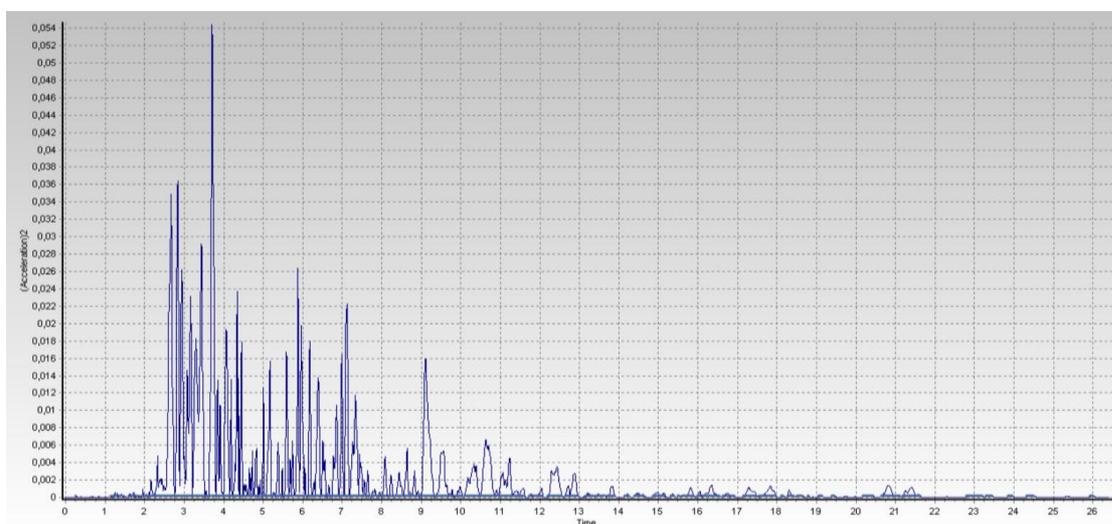
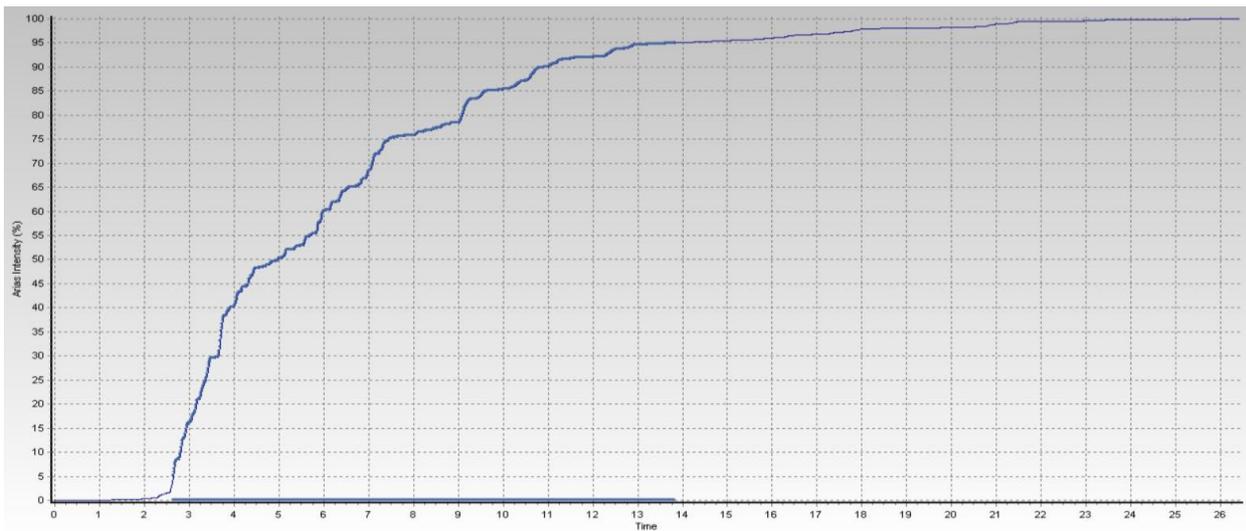
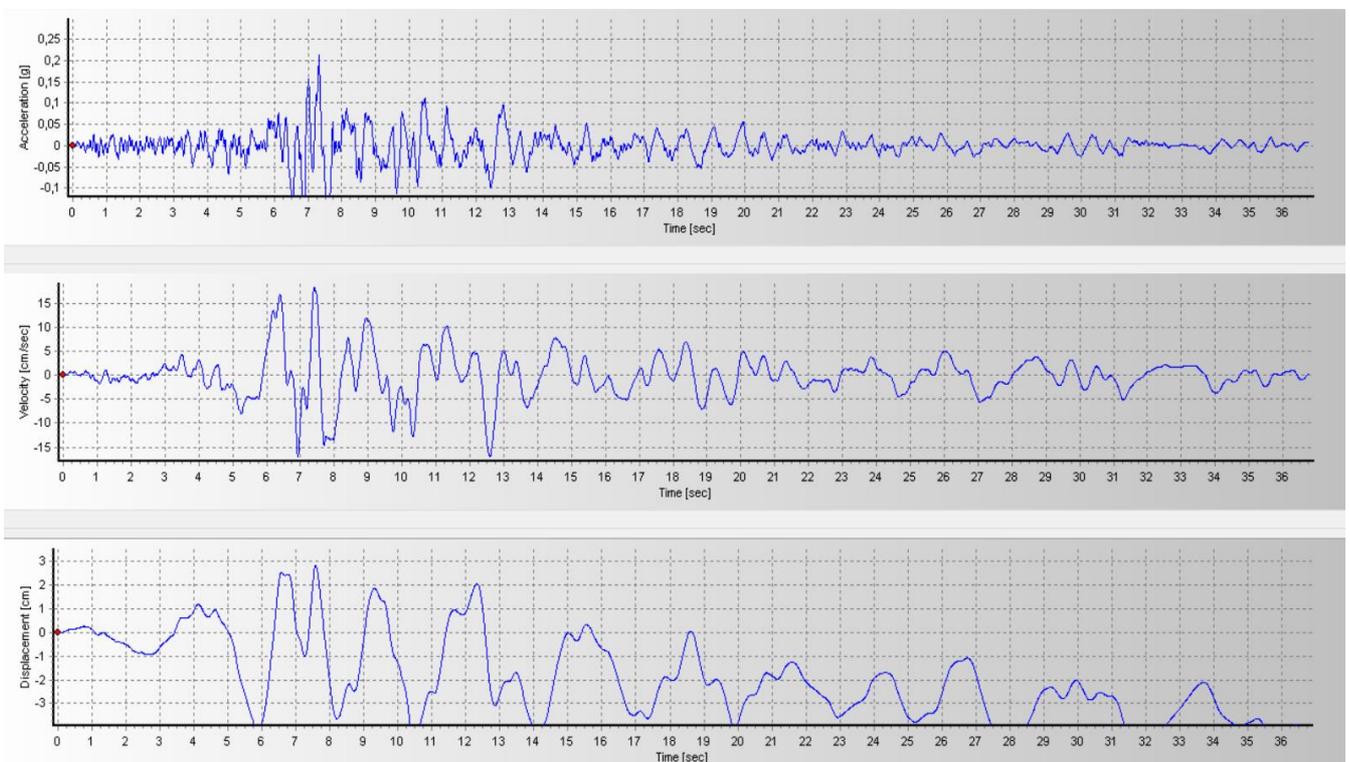


Fig. AP. 1.9. Durata uniforme, relativa al secondo accelerogramma selezionato.



*Fig. AP. 1.10. Durata significativa in funzione dell'intensità di Arias, relativa al secondo accelerogramma selezionato.*

### Accelerogramma 3



*Fig. AP. 1.11. Accelerazione, velocità e spostamento in funzione del tempo, ricavati dal terzo accelerogramma selezionato.*

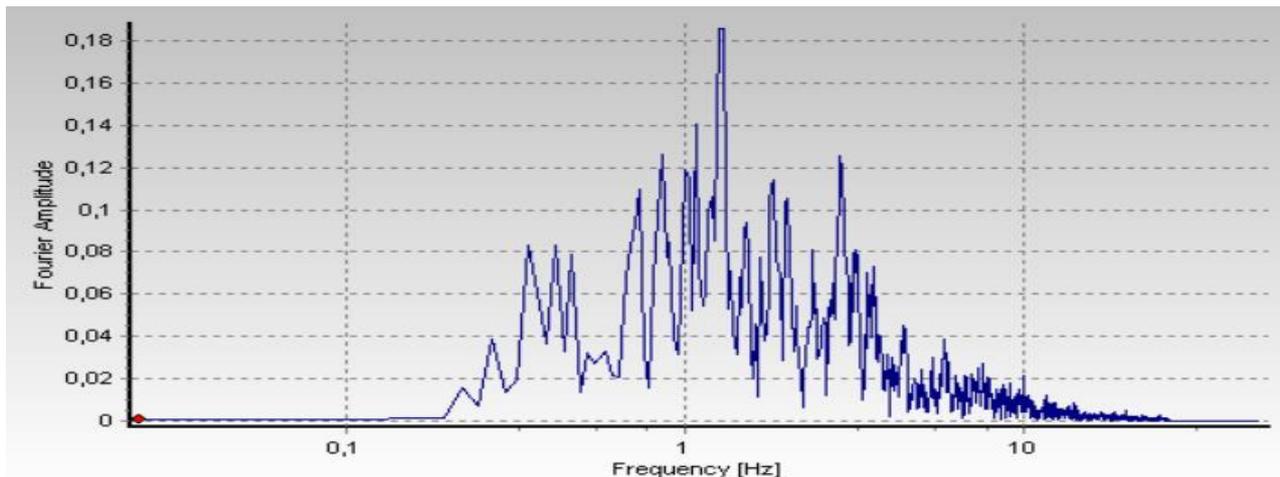


Fig. AP. 1.12. Spettro di Fourier delle componenti orizzontale e verticale per lo SLV.

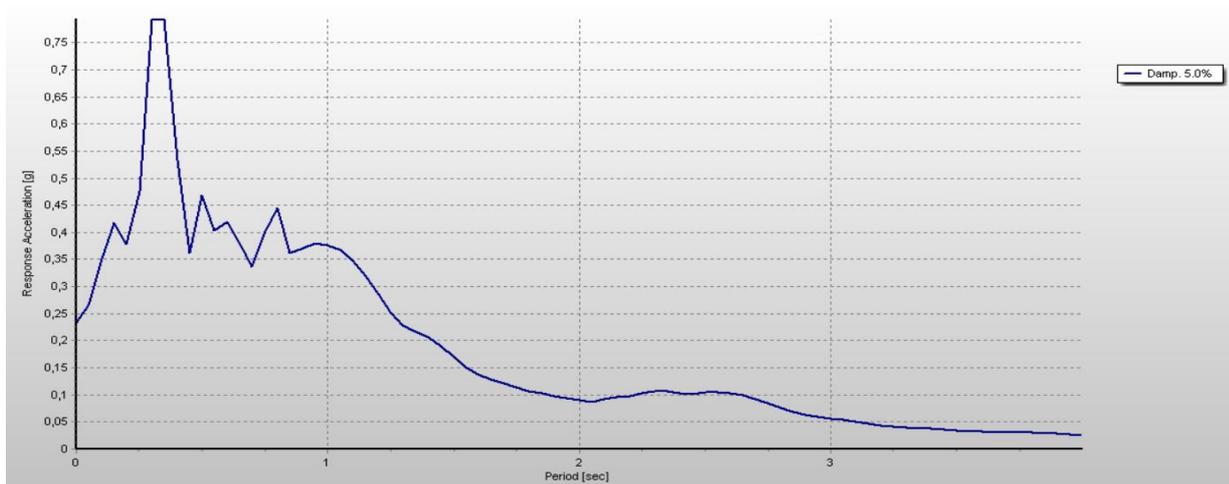


Fig. AP. 1.13. Spettro di risposta elastico in funzione dell'accelerazione, ricavato dal terzo accelerogramma selezionato.

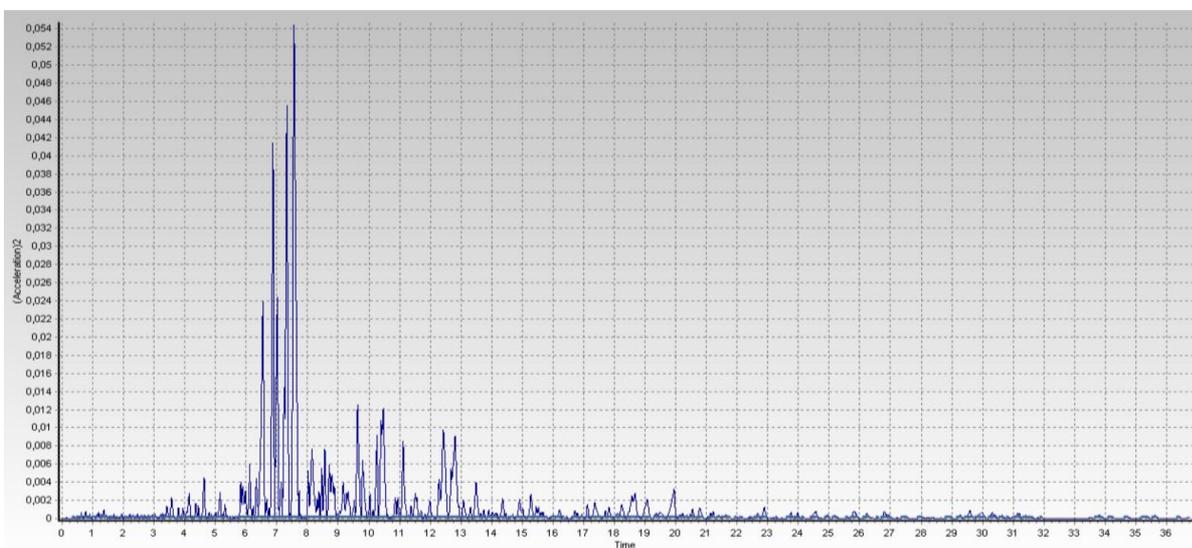
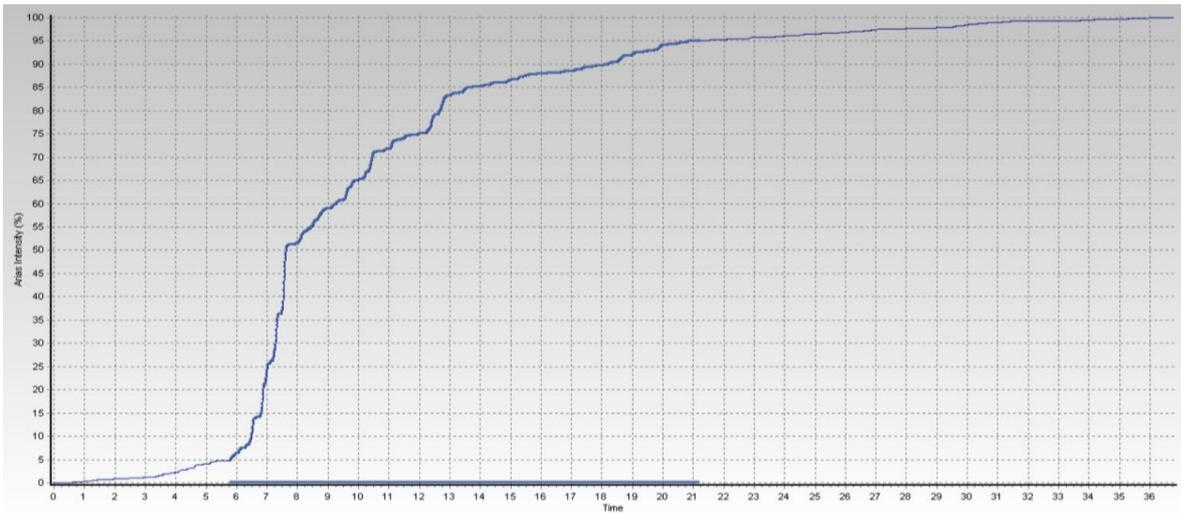
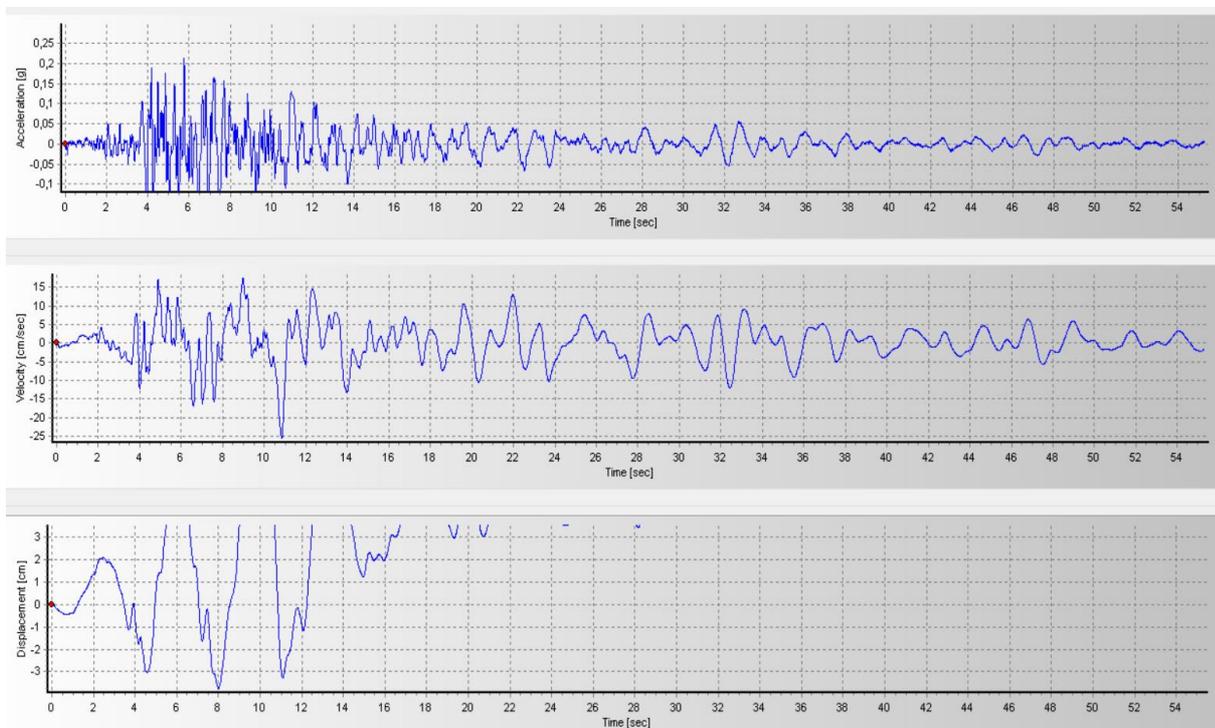


Fig. AP. 1.14. Durata uniforme, relativa al terzo accelerogramma selezionato.



*Fig. AP. 1.15. Durata significativa in funzione dell'intensità di Arias, relativa al terzo accelerogramma selezionato*

#### Accelerogramma 4



*Fig. AP. 1.16. Accelerazione, velocità e spostamento in funzione del tempo, ricavati dal quarto accelerogramma selezionato.*

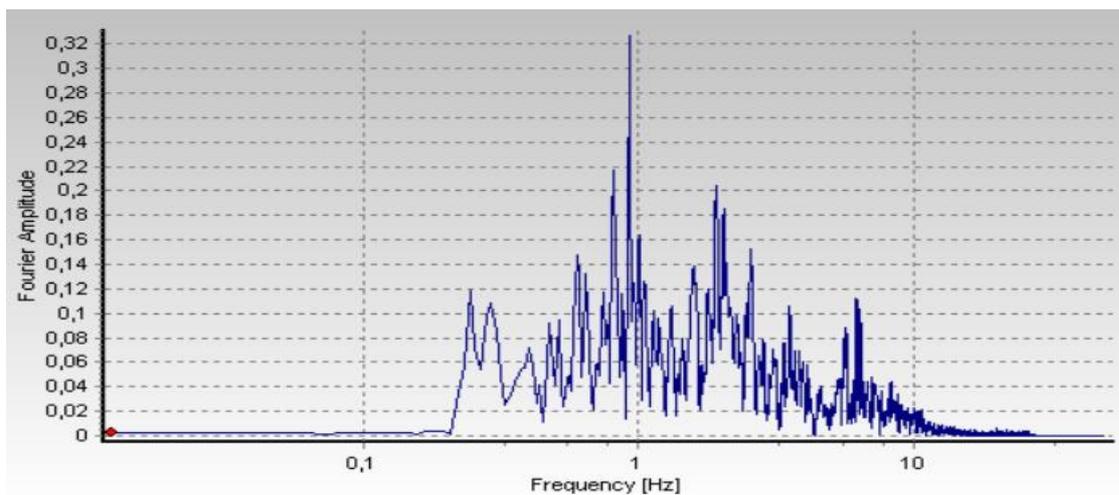


Fig. AP. 1.17. Spettro di Fourier delle componenti orizzontale e verticale per lo SLV.

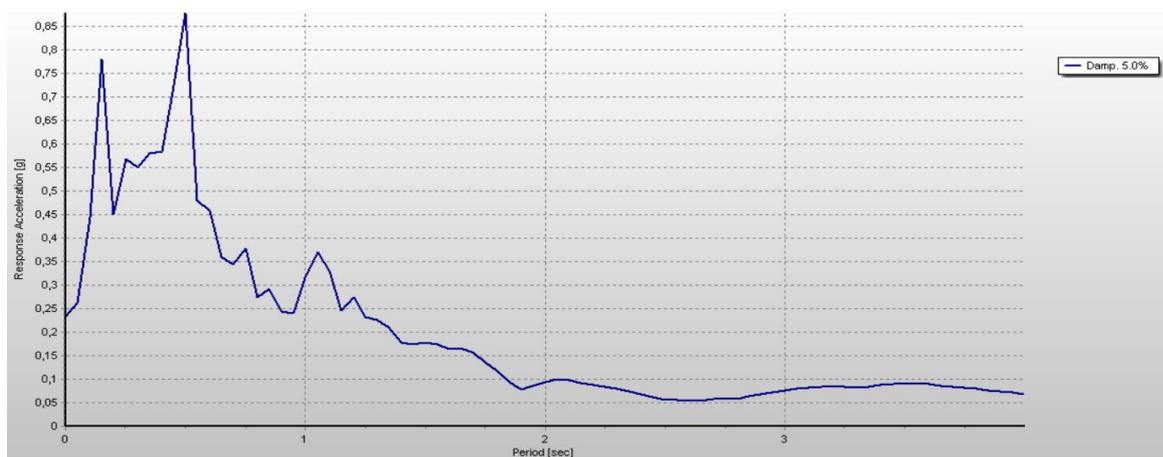


Fig. AP. 1.18. Spettro di risposta elastico in funzione dell'accelerazione, ricavato dal quarto accelerogramma selezionato.

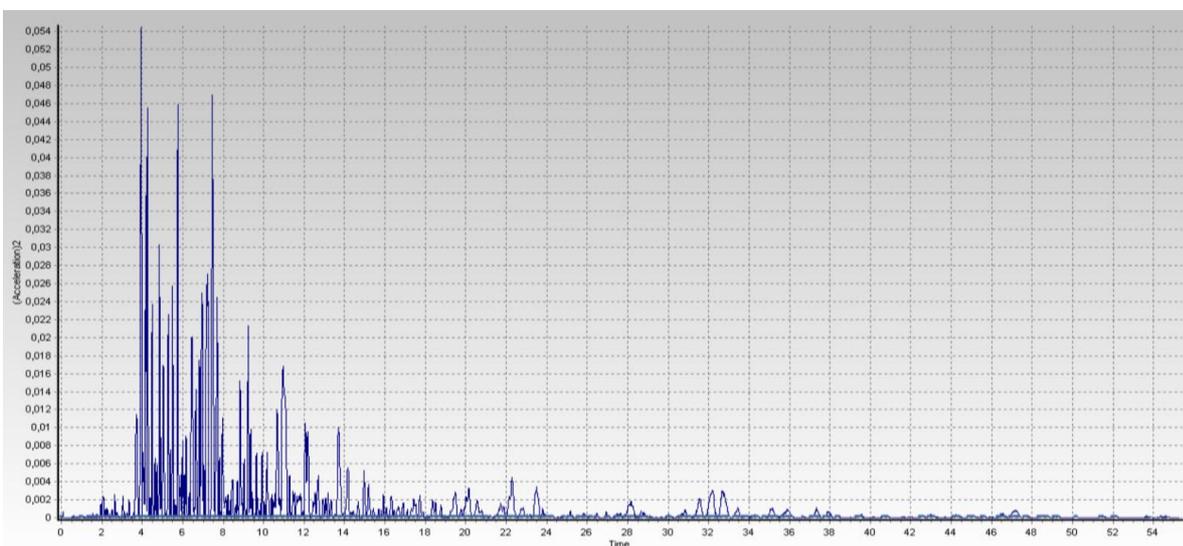
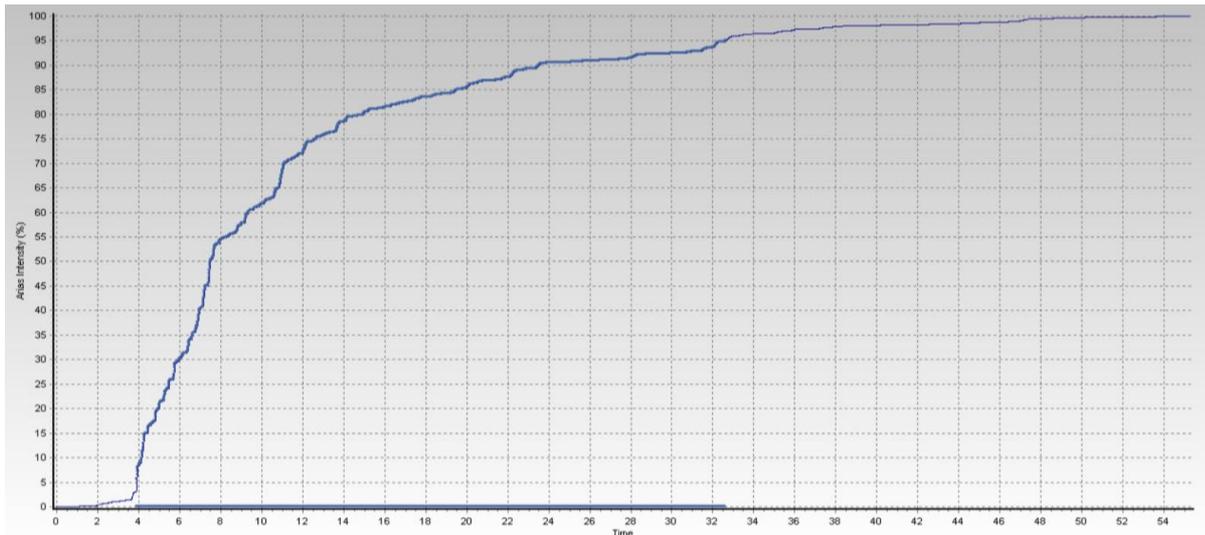
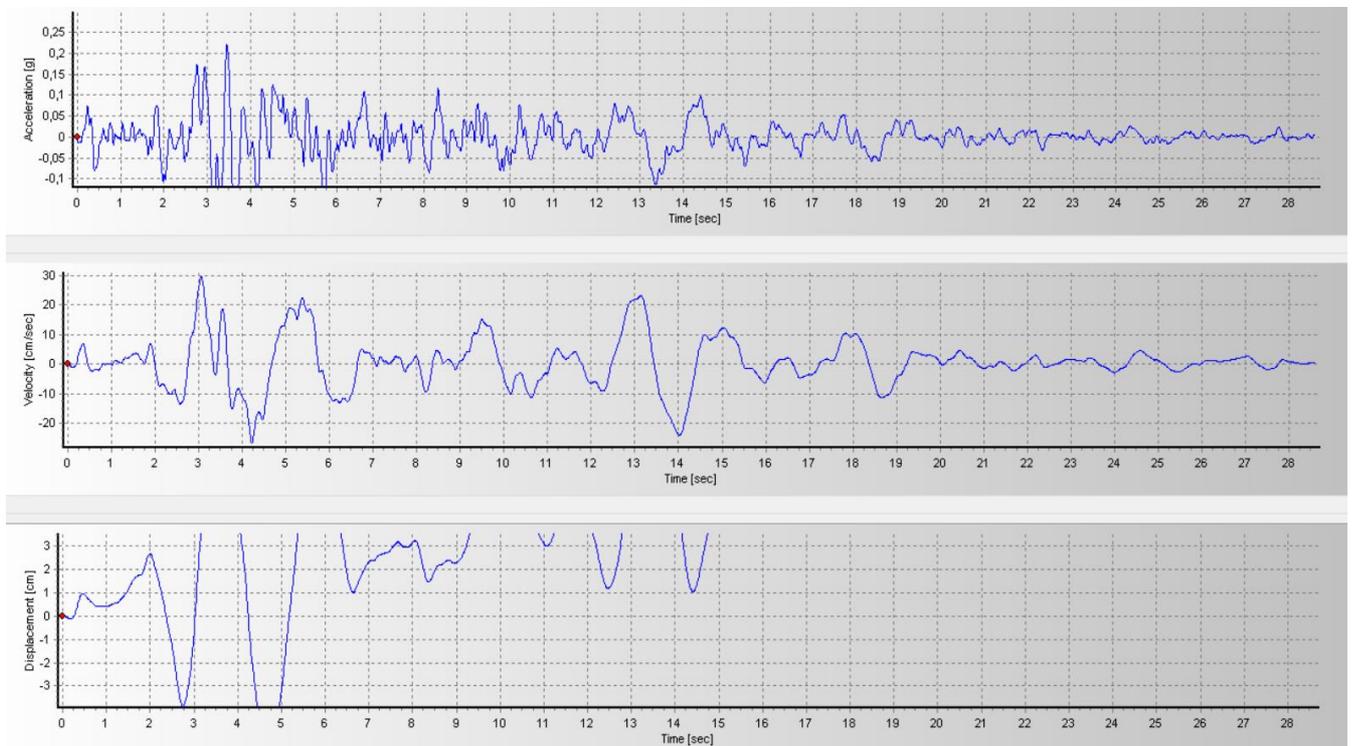


Fig. AP. 1.19. Durata uniforme, relativa al quarto accelerogramma selezionato



*Fig. AP. 1.20. Durata significativa in funzione dell'intensità di Arias, relativa al quarto accelerogramma selezionato*

### Accelerogramma 5



*Fig. AP. 1.21. Accelerazione, velocità e spostamento in funzione del tempo, ricavati dal quinto accelerogramma selezionato.*

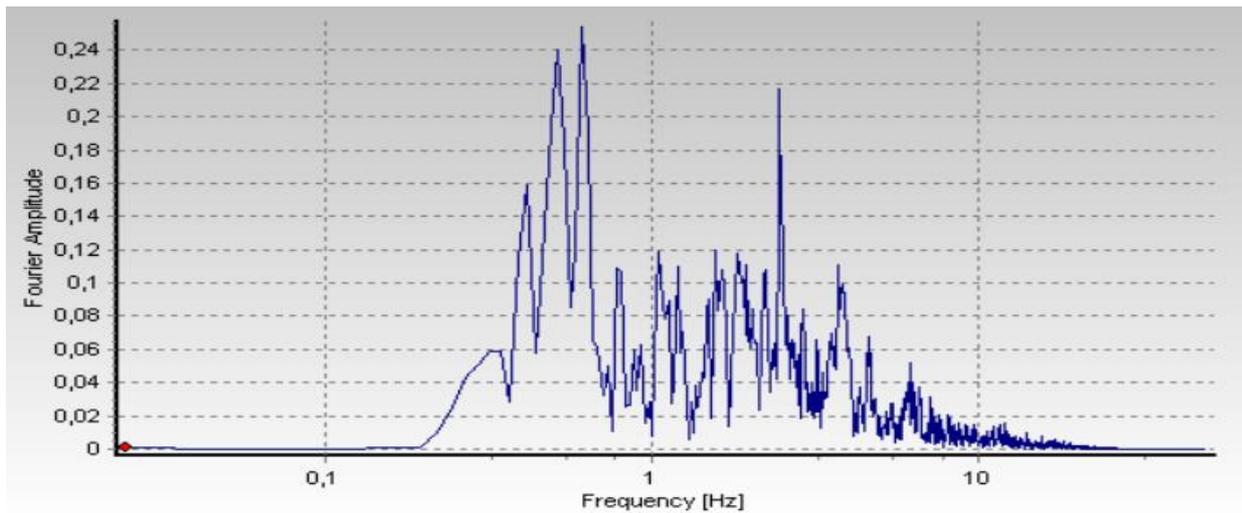


Fig. AP. 1.22. Spettro di Fourier delle componenti orizzontale e verticale per lo SLV.

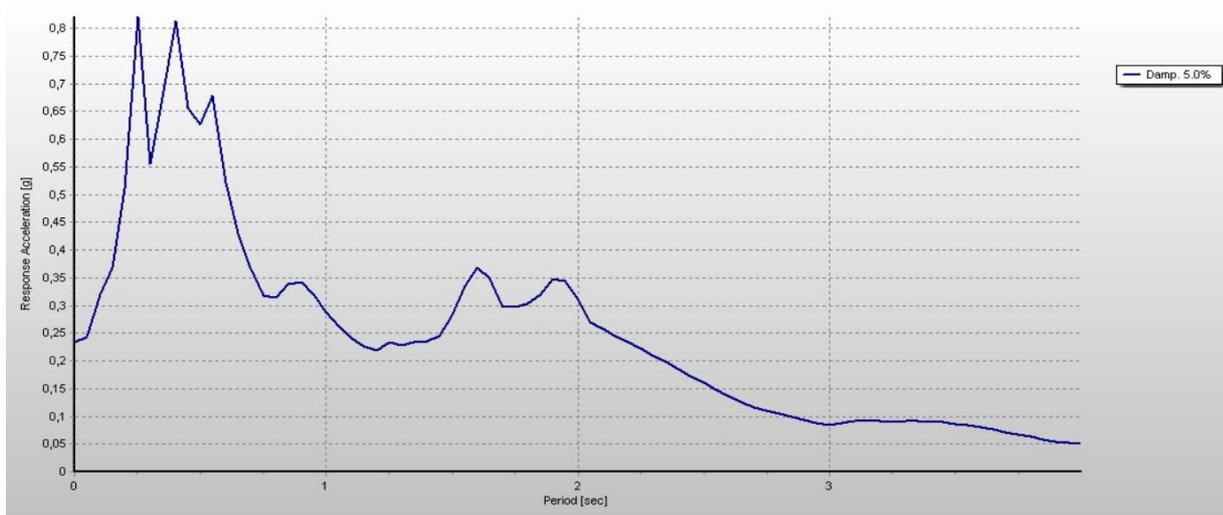


Fig. AP. 1.23. Spettro di risposta elastica in funzione dell'accelerazione, ricavato dal quinto accelerogramma selezionato.

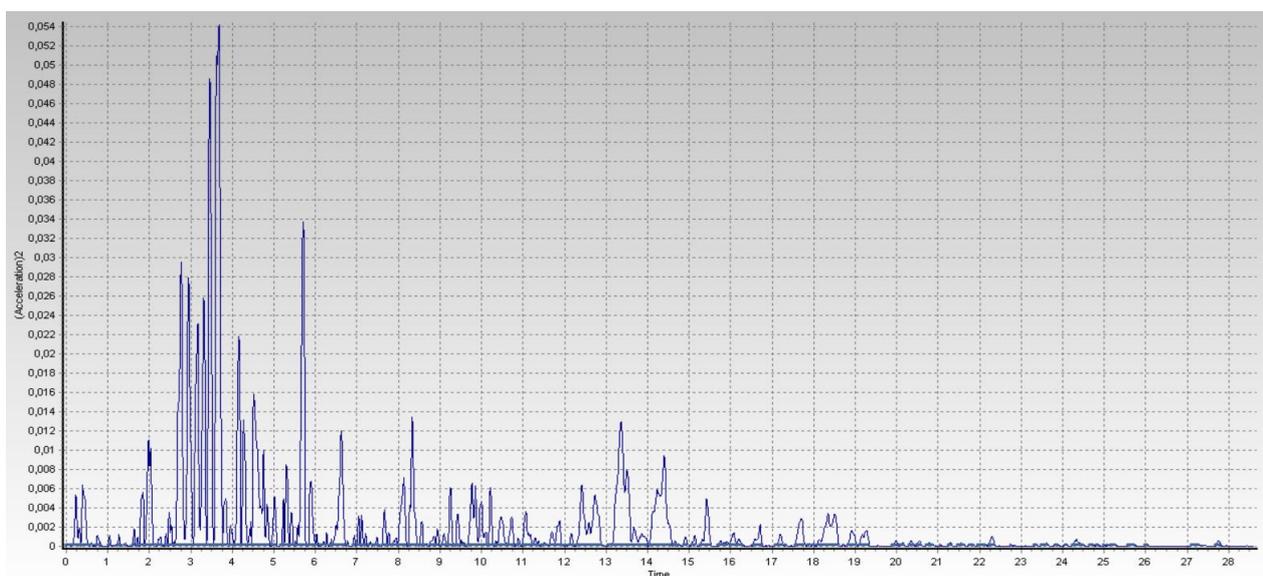


Fig. AP. 1.24. Durata uniforme, relativa al quinto accelerogramma selezionato

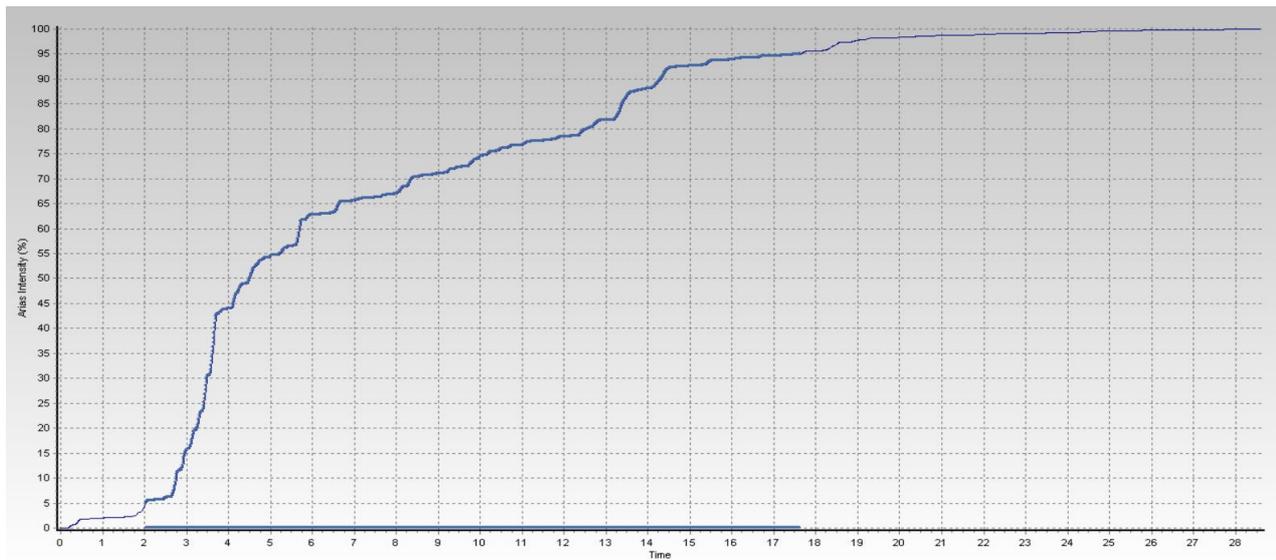


Fig. AP. 1.25. Durata significativa in funzione dell'intensità di Arias, relativa al quinto accelerogramma selezionato

### Accelerogramma 6

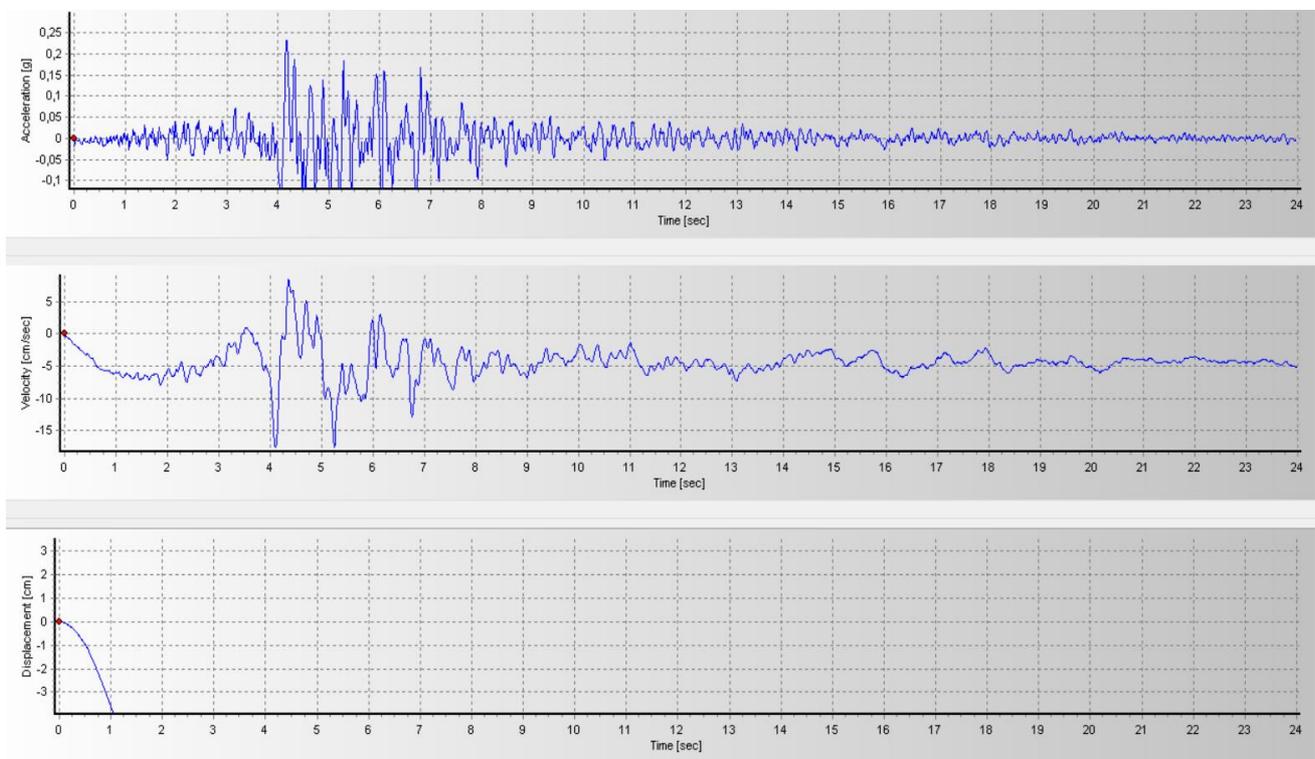


Fig. AP. 1.26. Accelerazione, velocità e spostamento in funzione del tempo, ricavati dal sesto accelerogramma selezionato.

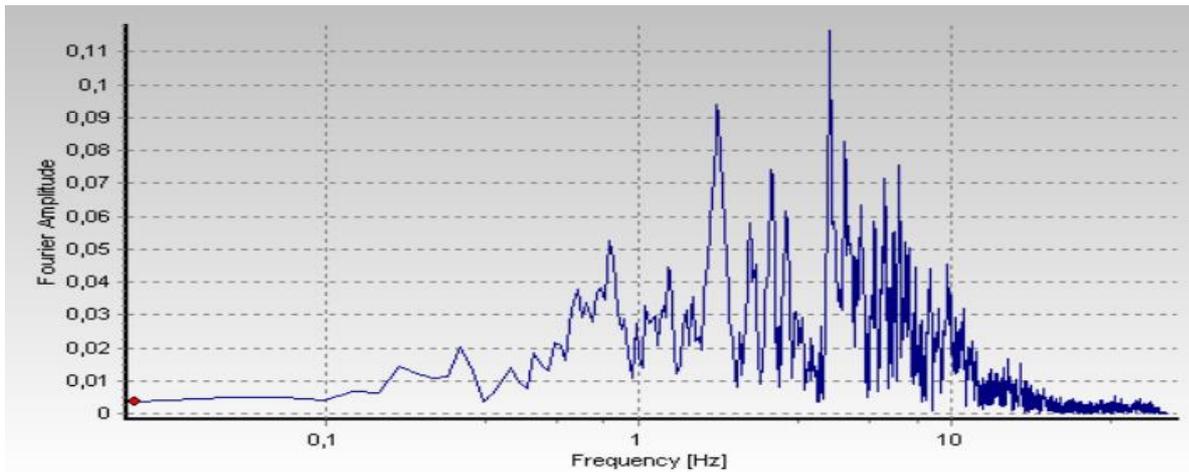


Fig. AP. 1.27. Spettro di Fourier delle componenti orizzontale e verticale per lo SLV.

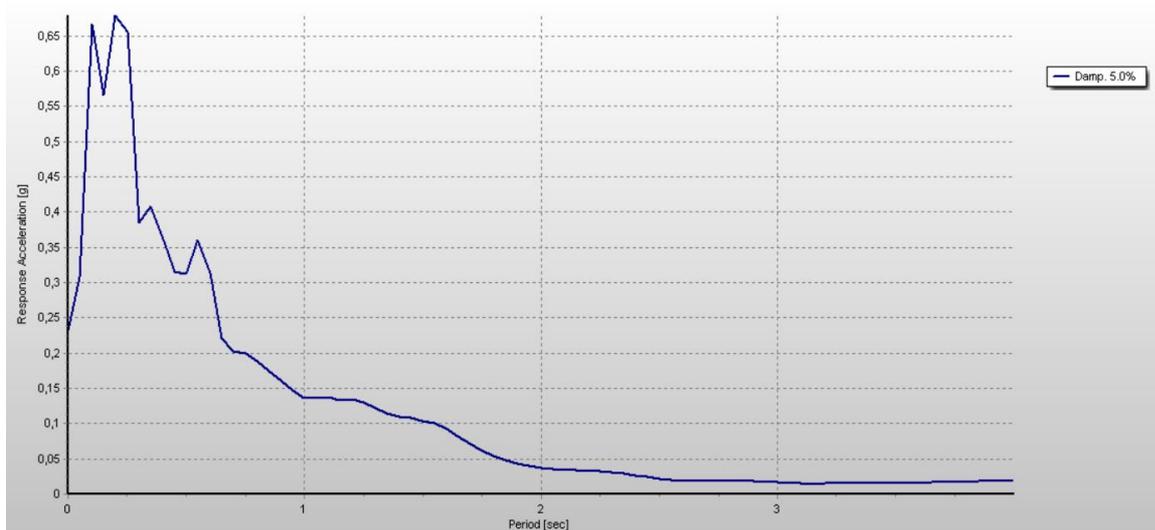


Fig. AP. 1.28. Spettro di risposta elastico in funzione dell'accelerazione, ricavato dal sesto accelerogramma selezionato.

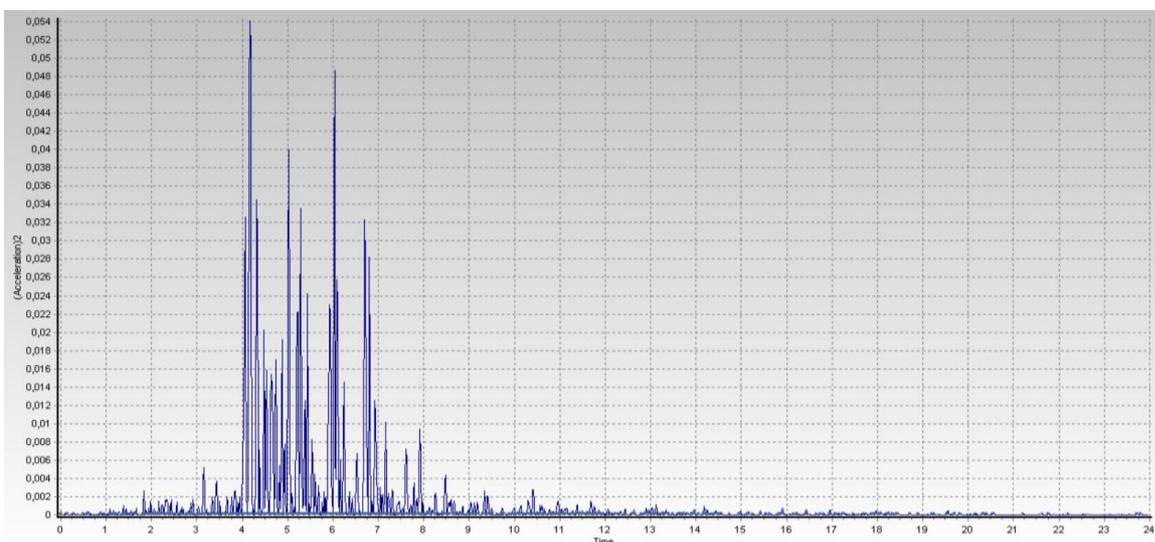
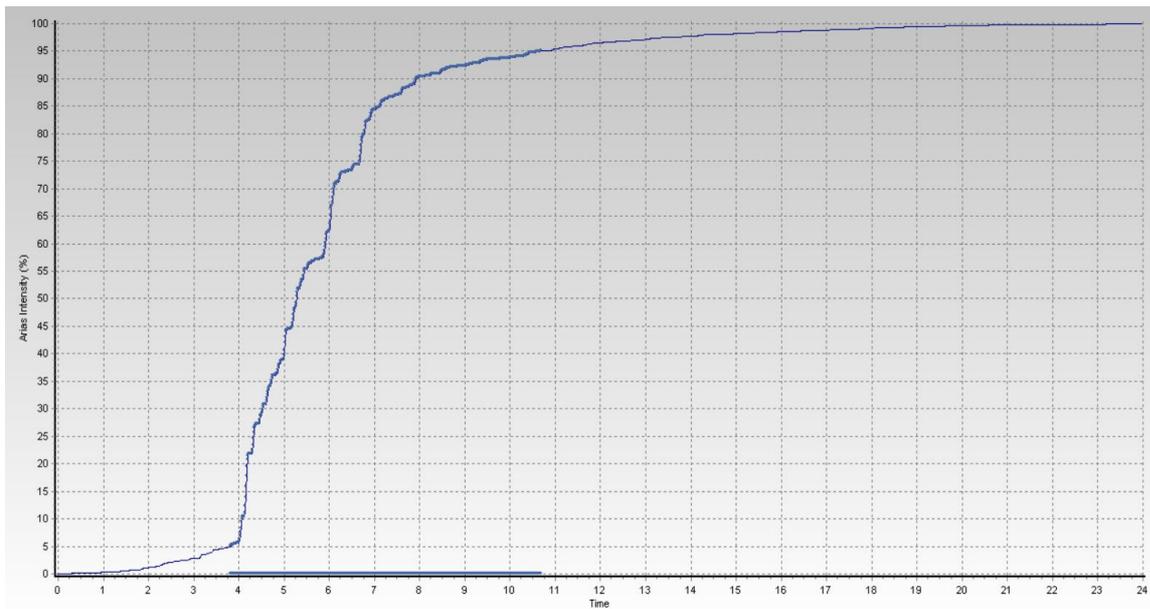
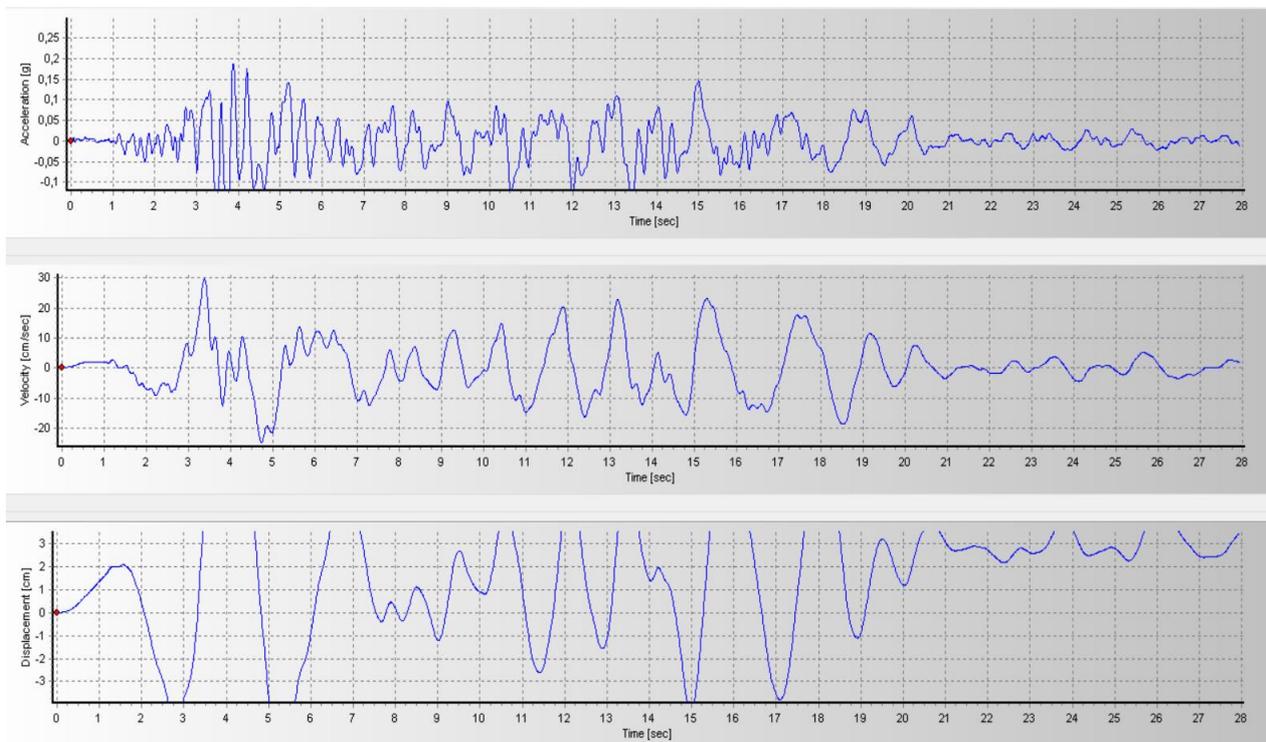


Fig. AP. 1.29. Durata uniforme, relativa al sesto accelerogramma selezionato



*Fig. AP. 1.30. Durata significativa in funzione dell'intensità di Arias, relativa al sesto accelerogramma selezionato*

### Accelerogramma 7



*Fig. AP. 1.31. Accelerazione, velocità e spostamento in funzione del tempo, ricavati dal settimo accelerogramma selezionato.*

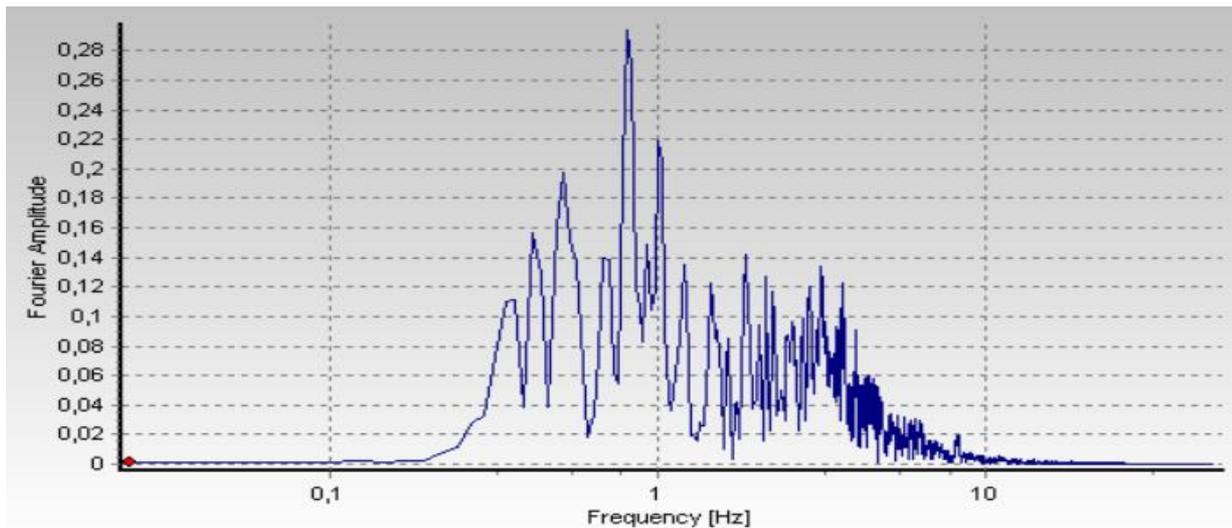


Fig. AP. 1.32. Spettro di Fourier delle componenti orizzontale e verticale per lo SLV.

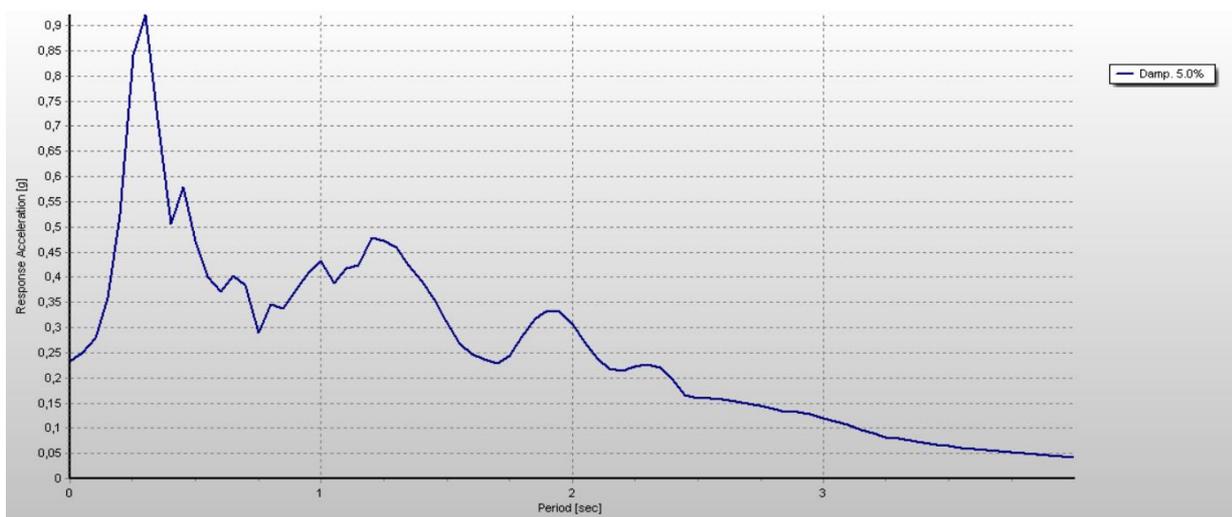


Fig. AP. 1.33. Spettro di risposta elastica in funzione dell'accelerazione, ricavato dal sesto accelerogramma selezionato.

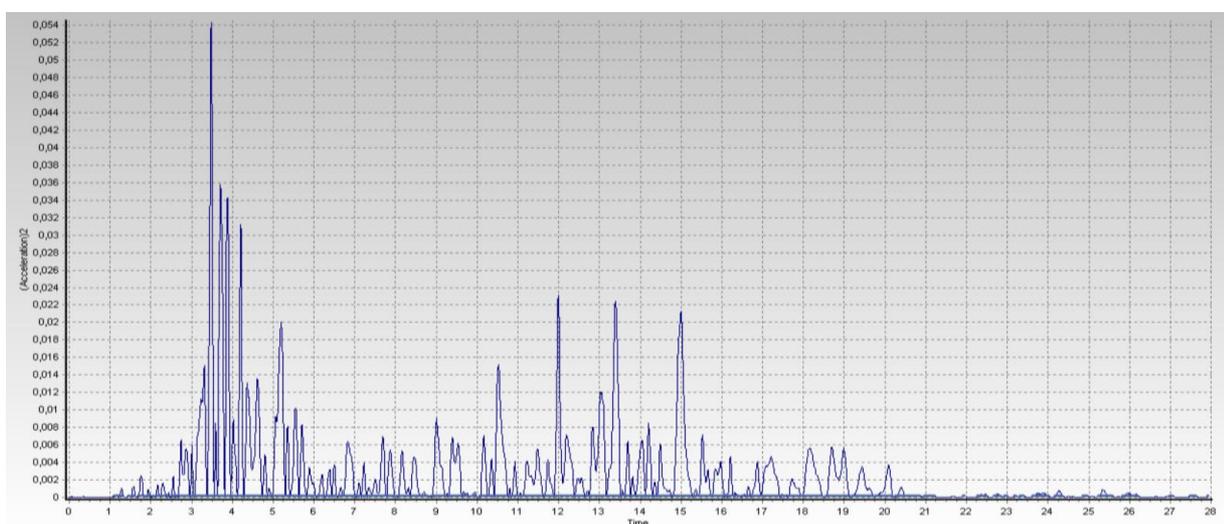
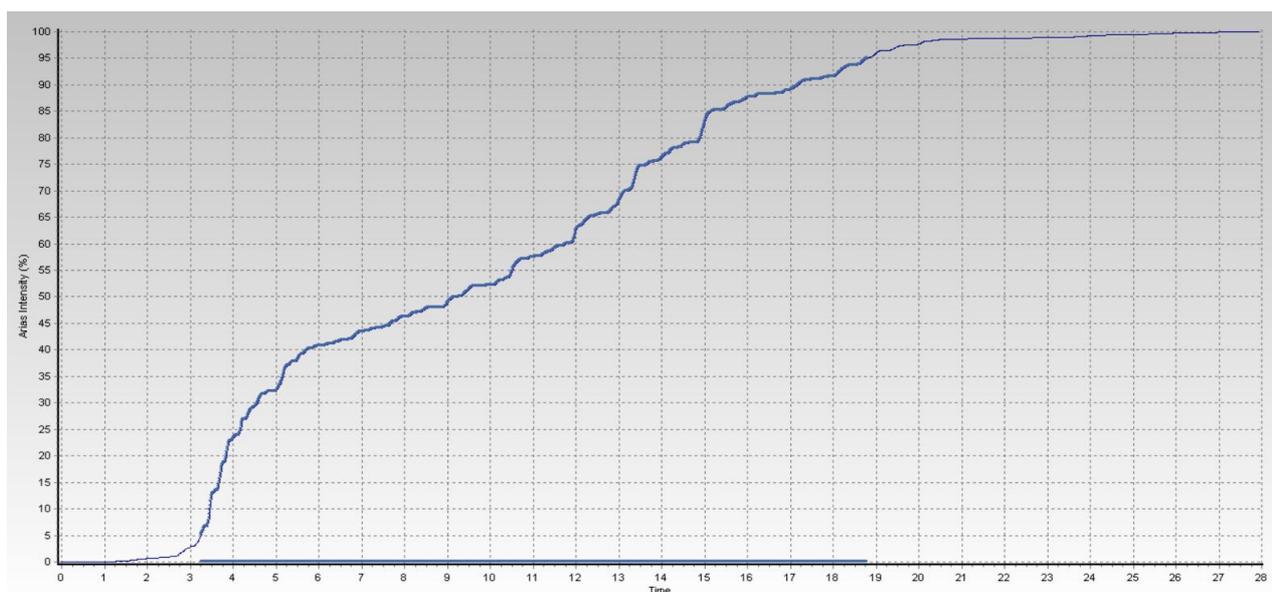


Fig. AP. 1.34. Durata uniforme, relativa al sesto accelerogramma selezionato



*Fig. AP. 1.35. Durata significativa in funzione dell'intensità di Arias, relativa al quinto accelerogramma selezionato*

A.2

Si riportano i dati corrispondenti ad ognuno dei 7 accelerogrammi spettrocompatibili, elaborati e scaricati con l'ausilio del Software *REXEL*, in termini di parametri fondamentali del moto sismico.

Accelerogramma 1

Parameter	Corrected Accelerogram
Max. Acceleration (g)	0,23539
Time of Max. Acceleration (sec)	8,77
Max. Velocity (cm/sec)	17,74144
Time of Max. Velocity (sec)	7,11
Max. Displacement (cm)	3,94227
Time of Max. Displacement (sec)	7,35
Vmax / Amax: (sec)	0,07683
Acceleration RMS: (g)	0,04132
Velocity RMS: (cm/sec)	5,01778
Displacement RMS: (cm)	1,37426
Arias Intensity: (m/sec)	0,76761
Characteristic Intensity (Ic)	0,04537
Specific Energy Density (cm <sup>2</sup> /sec)	734,69855
Cumulative Absolute Velocity (cm/sec)	781,25884
Acceleration Spectrum Intensity (g*sec)	0,21388
Velocity Spectrum Intensity (cm)	101,10316
Housner Intensity (cm)	92,85556
Sustained Maximum Acceleration (g)	0,15316
Sustained Maximum Velocity (cm/sec)	16,81184
Effective Design Acceleration (g)	0,23505
A95 parameter (g)	0,23243
Predominant Period (sec)	0,52
Mean Period (sec)	0,64185
Max Incremental Velocity (cm/sec)	34,40994
Damage Index((g) <sup>c</sup> )	0,82433
Number of Effective Cycles	2,34834
IP Index	44,05303
Sa,avg (g)	0,22506

Accelerogramma 2

Parameter	Corrected Accelerogram
Max. Acceleration (g)	0,23322
Time of Max. Acceleration (sec)	3,7
Max. Velocity (cm/sec)	27,31033
Time of Max. Velocity (sec)	2,76
Max. Displacement (cm)	4,8645
Time of Max. Displacement (sec)	9,14
Vmax / Amax: (sec)	0,11937
Acceleration RMS: (g)	0,04207
Velocity RMS: (cm/sec)	4,88842
Displacement RMS: (cm)	2,25168
Arias Intensity: (m/sec)	0,72045
Characteristic Intensity (Ic)	0,04435
Specific Energy Density (cm <sup>2</sup> /sec)	631,34901
Cumulative Absolute Velocity (cm/sec)	674,70694
Acceleration Spectrum Intensity (g*sec)	0,20162
Velocity Spectrum Intensity (cm)	105,82926
Housner Intensity (cm)	86,27733
Sustained Maximum Acceleration (g)	0,17083
Sustained Maximum Velocity (cm/sec)	14,09453
Effective Design Acceleration (g)	0,23313
A95 parameter (g)	0,22791
Predominant Period (sec)	0,28
Mean Period (sec)	0,60035
Max Incremental Velocity (cm/sec)	46,00446
Damage Index((g) <sup>c</sup> )	1,03333
Number of Effective Cycles	3,16475
IP Index	24,64779
Sa,avg (g)	0,20756

Accelerogramma 3

Parameter	Corrected Accelerogram
Max. Acceleration (g)	0,23327
Time of Max. Acceleration (sec)	7,56
Max. Velocity (cm/sec)	18,20254
Time of Max. Velocity (sec)	7,4
Max. Displacement (cm)	4,84467
Time of Max. Displacement (sec)	31,92
Vmax / Amax: (sec)	0,07954
Acceleration RMS: (g)	0,03191
Velocity RMS: (cm/sec)	4,29362
Displacement RMS: (cm)	2,61846
Arias Intensity: (m/sec)	0,57718
Characteristic Intensity (Ic)	0,03457
Specific Energy Density (cm <sup>2</sup> /sec)	678,0456
Cumulative Absolute Velocity (cm/sec)	708,49514
Acceleration Spectrum Intensity (g*sec)	0,2146
Velocity Spectrum Intensity (cm)	101,87955
Housner Intensity (cm)	91,21914
Sustained Maximum Acceleration (g)	0,20354
Sustained Maximum Velocity (cm/sec)	16,86999
Effective Design Acceleration (g)	0,23544
A95 parameter (g)	0,23033
Predominant Period (sec)	0,34
Mean Period (sec)	0,68942
Max Incremental Velocity (cm/sec)	32,75278
Damage Index((g) <sup>c</sup> )	0,69874
Number of Effective Cycles	1,75204
IP Index	38,94976
Sa,avg (g)	0,22205

**Accelerogramma 4**

Parameter	Corrected Accelerogram
Max. Acceleration (g)	0,23323
Time of Max. Acceleration (sec)	3,94
Max. Velocity (cm/sec)	25,60966
Time of Max. Velocity (sec)	10,85
Max. Displacement (cm)	15,25818
Time of Max. Displacement (sec)	54,61
Vmax / Amax: (sec)	0,11193
Acceleration RMS: (g)	0,03516
Velocity RMS: (cm/sec)	5,02771
Displacement RMS: (cm)	8,34009
Arias Intensity: (m/sec)	1,05371
Characteristic Intensity (Ic)	0,04904
Specific Energy Density (cm2/sec)	1397,8644
Cumulative Absolute Velocity (cm/sec)	1165,08931
Acceleration Spectrum Intensity (g*sec)	0,23935
Velocity Spectrum Intensity (cm)	92,17494
Housner Intensity (cm)	86,73993
Sustained Maximum Acceleration (g)	0,21417
Sustained Maximum Velocity (cm/sec)	17,08161
Effective Design Acceleration (g)	0,23584
A95 parameter (g)	0,22912
Predominant Period (sec)	0,5
Mean Period (sec)	0,64396
Max Incremental Velocity (cm/sec)	31,95075
Damage Index((g)^c)	1,37421
Number of Effective Cycles	3,85113
IP Index	45,4701
Sa,avg (g)	0,21285

**Accelerogramma 5**

Parameter	Corrected Accelerogram
Max. Acceleration (g)	0,23288
Time of Max. Acceleration (sec)	3,68
Max. Velocity (cm/sec)	29,47386
Time of Max. Velocity (sec)	3,05
Max. Displacement (cm)	15,22689
Time of Max. Displacement (sec)	13,44
Vmax / Amax: (sec)	0,12901
Acceleration RMS: (g)	0,04381
Velocity RMS: (cm/sec)	7,97373
Displacement RMS: (cm)	8,40668
Arias Intensity: (m/sec)	0,84605
Characteristic Intensity (Ic)	0,04904
Specific Energy Density (cm2/sec)	1819,03261
Cumulative Absolute Velocity (cm/sec)	785,4877
Acceleration Spectrum Intensity (g*sec)	0,2475
Velocity Spectrum Intensity (cm)	146,29553
Housner Intensity (cm)	140,9551
Sustained Maximum Acceleration (g)	0,17187
Sustained Maximum Velocity (cm/sec)	23,90506
Effective Design Acceleration (g)	0,23192
A95 parameter (g)	0,22995
Predominant Period (sec)	0,26
Mean Period (sec)	0,90007
Max Incremental Velocity (cm/sec)	47,02739
Damage Index((g)^c)	0,79525
Number of Effective Cycles	1,93486
IP Index	26,6259
Sa,avg (g)	0,32131

Accelerogramma 6

Parameter	Corrected Accelerogram
Max. Acceleration (g)	0,23257
Time of Max. Acceleration (sec)	4,16
Max. Velocity (cm/sec)	17,58237
Time of Max. Velocity (sec)	4,1
Max. Displacement (cm)	105,03135
Time of Max. Displacement (sec)	23,98
Vmax / Amax: (sec)	0,07706
Acceleration RMS: (g)	0,03471
Velocity RMS: (cm/sec)	4,98173
Displacement RMS: (cm)	60,86495
Arias Intensity: (m/sec)	0,44507
Characteristic Intensity (Ic)	0,03166
Specific Energy Density (cm <sup>2</sup> /sec)	595,12591
Cumulative Absolute Velocity (cm/sec)	442,90962
Acceleration Spectrum Intensity (g*sec)	0,18761
Velocity Spectrum Intensity (cm)	55,57827
Housner Intensity (cm)	45,94778
Sustained Maximum Acceleration (g)	0,19999
Sustained Maximum Velocity (cm/sec)	12,92774
Effective Design Acceleration (g)	0,23867
A95 parameter (g)	0,22965
Predominant Period (sec)	0,24
Mean Period (sec)	0,3014
Max Incremental Velocity (cm/sec)	17,33183
Damage Index((g) <sup>c</sup> )	1,25653
Number of Effective Cycles	3,68008
IP Index	24,82196
Sa,avg (g)	0,1176

Accelerogramma 7

Parameter	Corrected Accelerogram
Max. Acceleration (g)	0,23304
Time of Max. Acceleration (sec)	3,48
Max. Velocity (cm/sec)	29,77057
Time of Max. Velocity (sec)	3,38
Max. Displacement (cm)	7,81426
Time of Max. Displacement (sec)	15,88
Vmax / Amax: (sec)	0,13022
Acceleration RMS: (g)	0,04905
Velocity RMS: (cm/sec)	8,49986
Displacement RMS: (cm)	3,28719
Arias Intensity: (m/sec)	1,03627
Characteristic Intensity (Ic)	0,05743
Specific Energy Density (cm <sup>2</sup> /sec)	2019,31899
Cumulative Absolute Velocity (cm/sec)	956,75067
Acceleration Spectrum Intensity (g*sec)	0,24349
Velocity Spectrum Intensity (cm)	155,20737
Housner Intensity (cm)	150,44271
Sustained Maximum Acceleration (g)	0,17656
Sustained Maximum Velocity (cm/sec)	23,11197
Effective Design Acceleration (g)	0,23121
A95 parameter (g)	0,22774
Predominant Period (sec)	0,3
Mean Period (sec)	0,8958
Max Incremental Velocity (cm/sec)	38,55477
Damage Index((g) <sup>c</sup> )	0,93766
Number of Effective Cycles	2,68146
IP Index	32,10902
Sa,avg (g)	0,33815

## APPENDICE B

B.1

Si riportano i grafici degli spostamenti (di cui i valori calcolati in entrambe le direzioni dell'accelerogramma) ottenuti per procedura di doppia integrazione dell'input sismico tramite l'ausilio del software *Matlab*, per ognuno dei 7 accelerogrammi al variare di dell'*accelerazione limite*  $a_{lim} (K_y)$ .

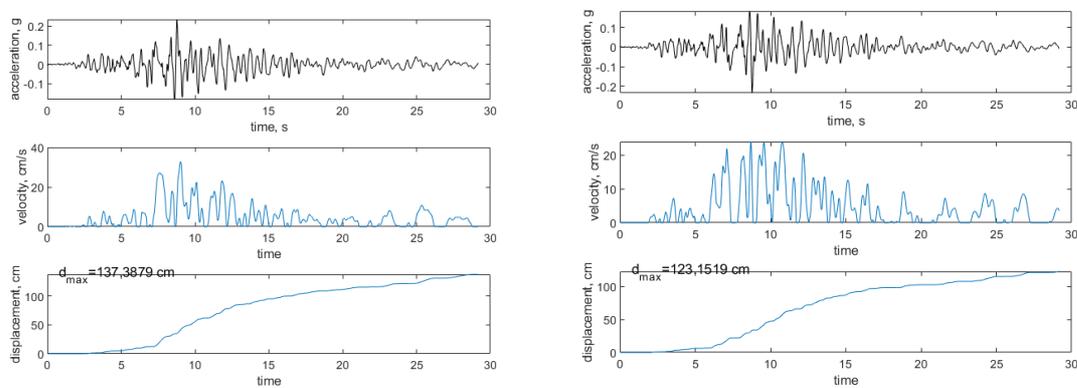
Accelerogramma 1

Fig. AP. 2.1. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,005$

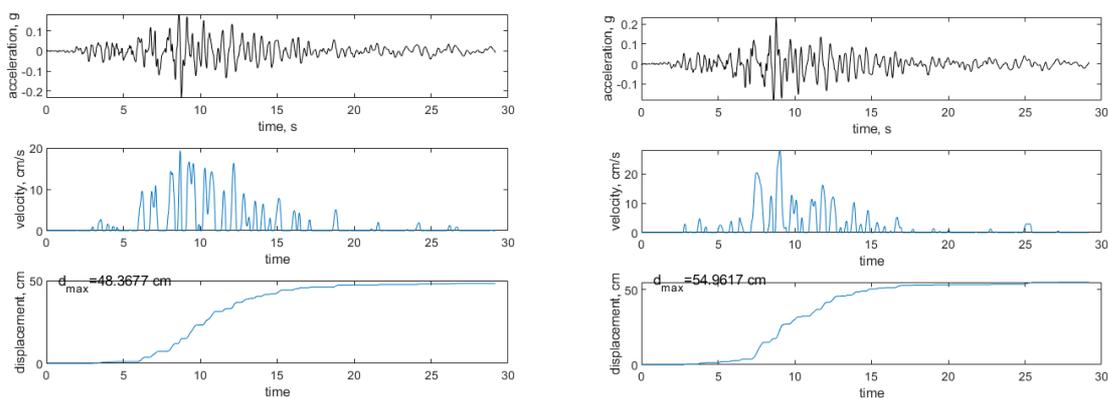
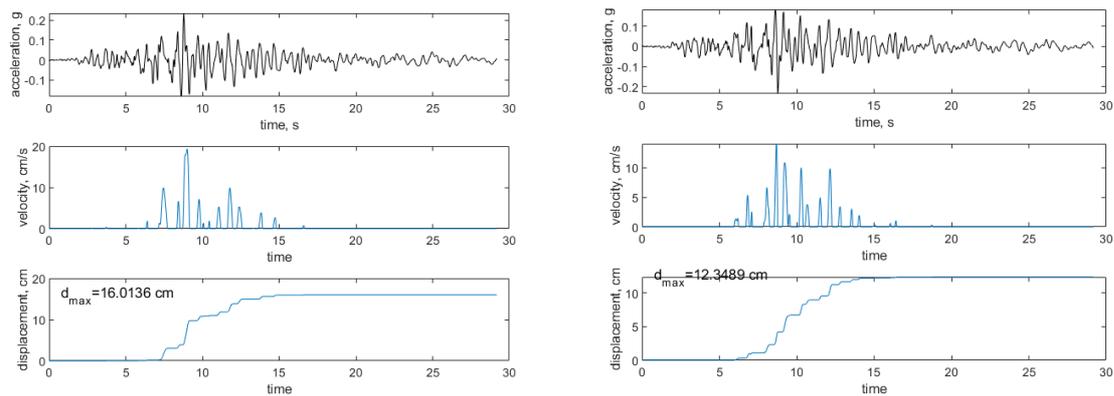
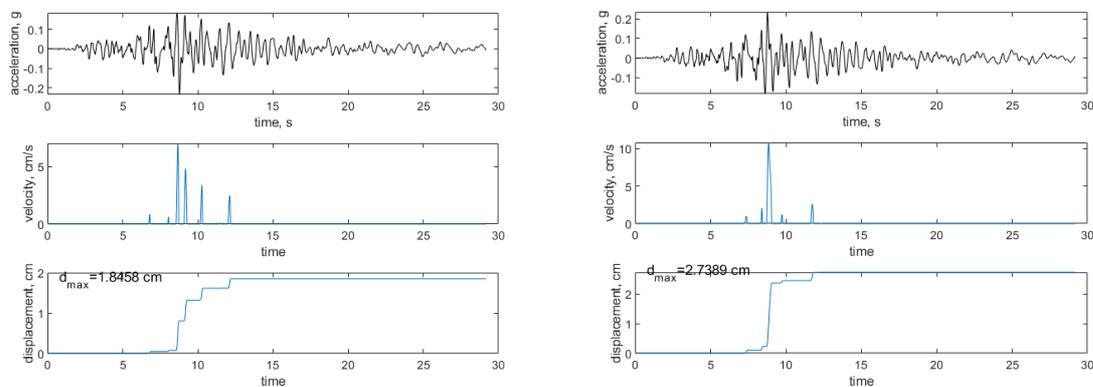


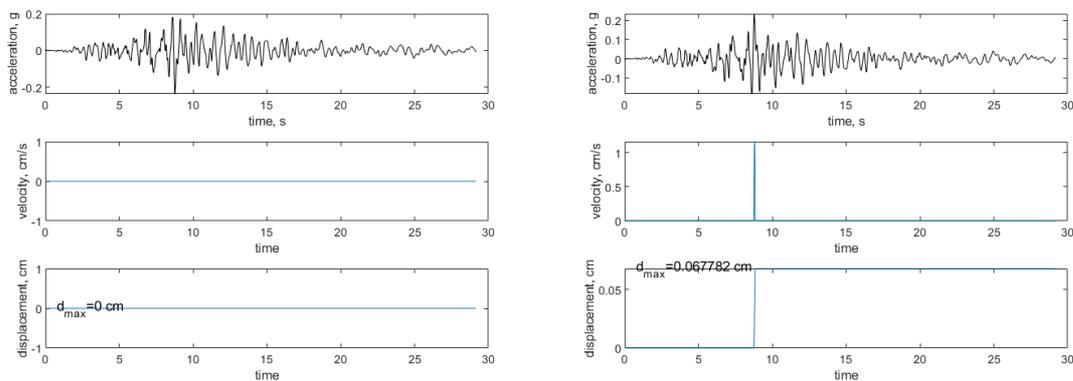
Fig. AP. 2.2. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,02$



**Fig. AP. 2.3.** Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,05$



**Fig. AP. 2.4.** Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,1$



**Fig. AP. 2.5.** Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,2$

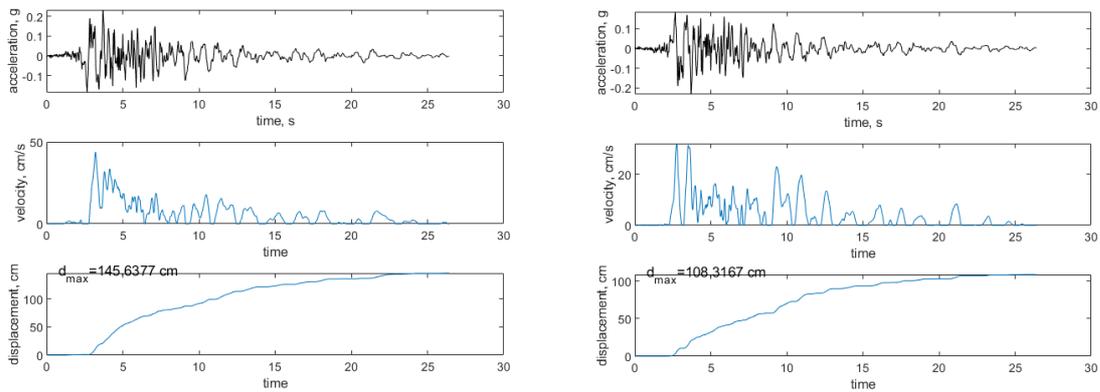
Accelerogramma 2

Fig. AP. 2.6. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,005$

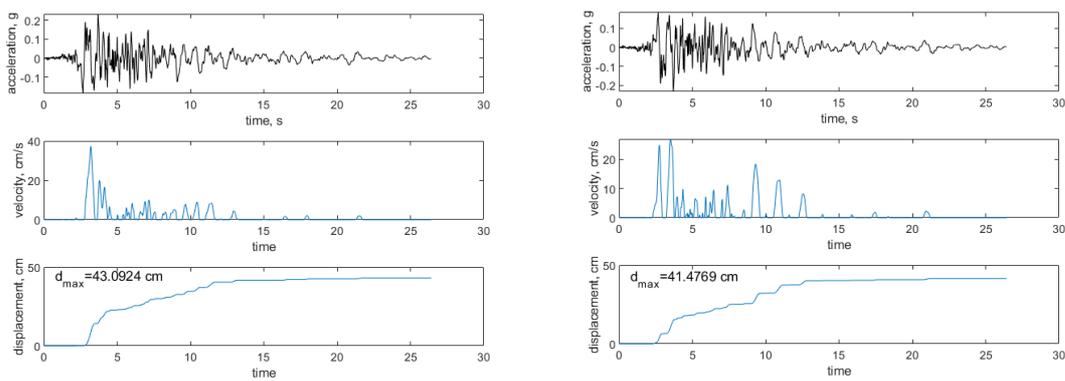


Fig. AP. 2.7. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,02$

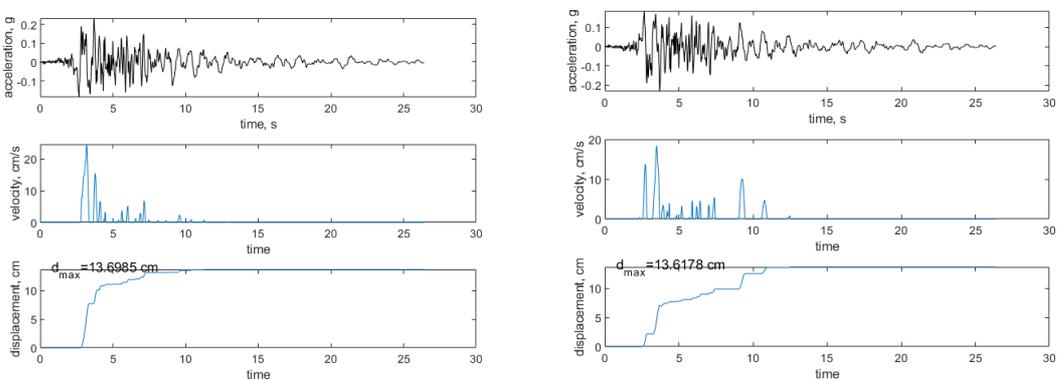


Fig. AP. 2.8. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,05$

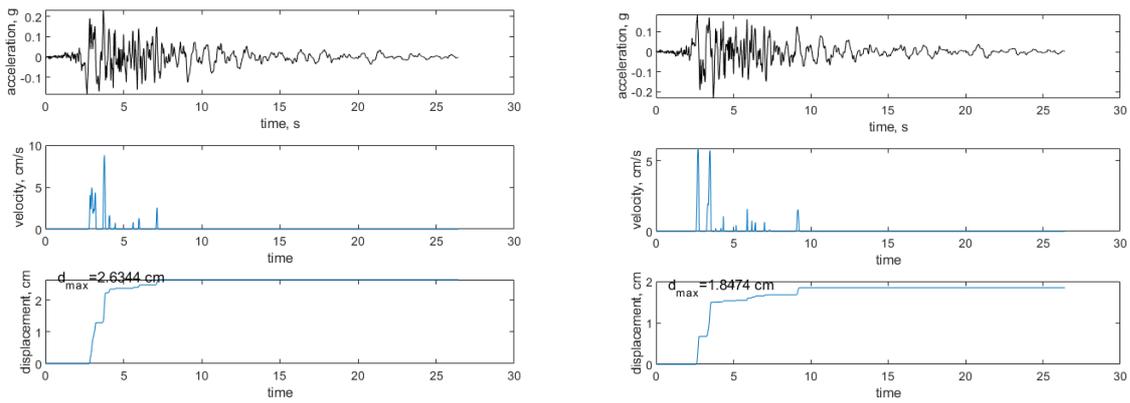


Fig. AP. 2.9. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,1$

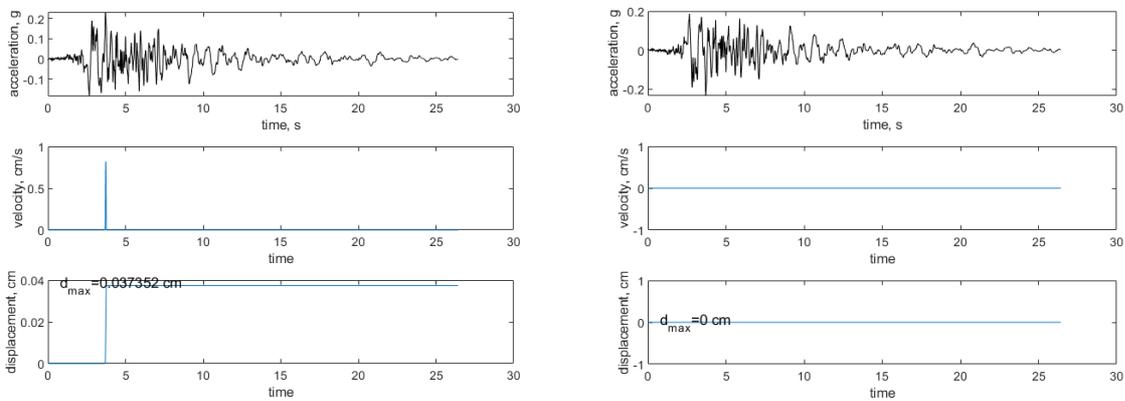


Fig. AP. 2.10. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,2$

Accelerogramma 3

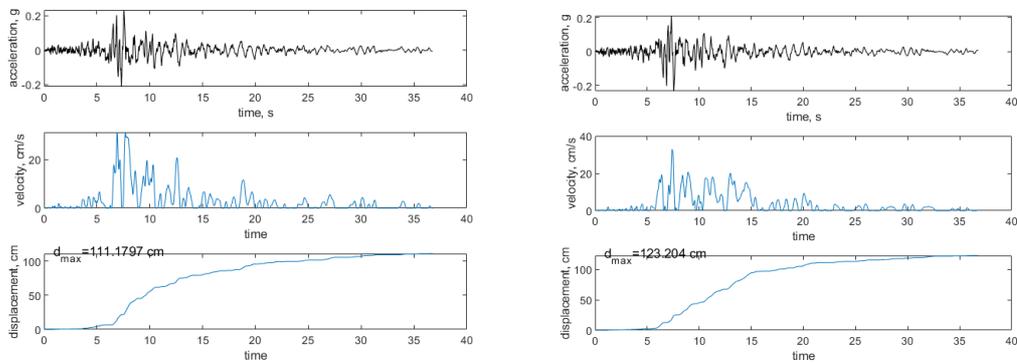


Fig. AP. 2.11. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,005$

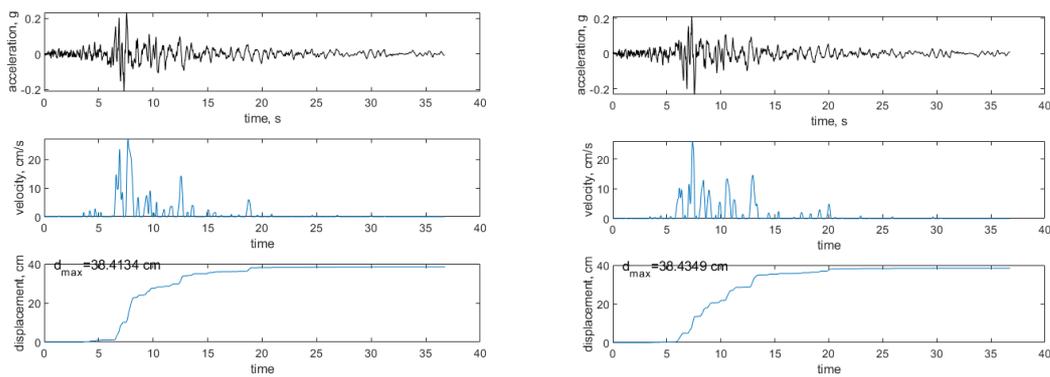


Fig. AP. 2.12. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,02$

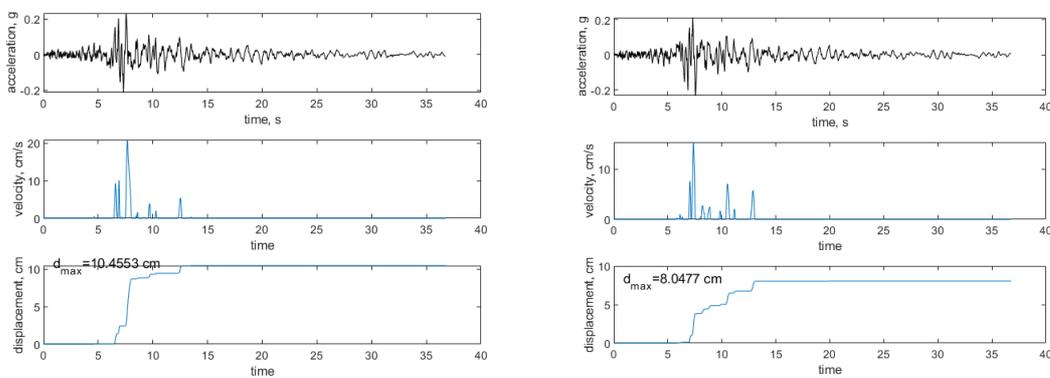


Fig. AP. 2.13. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,05$

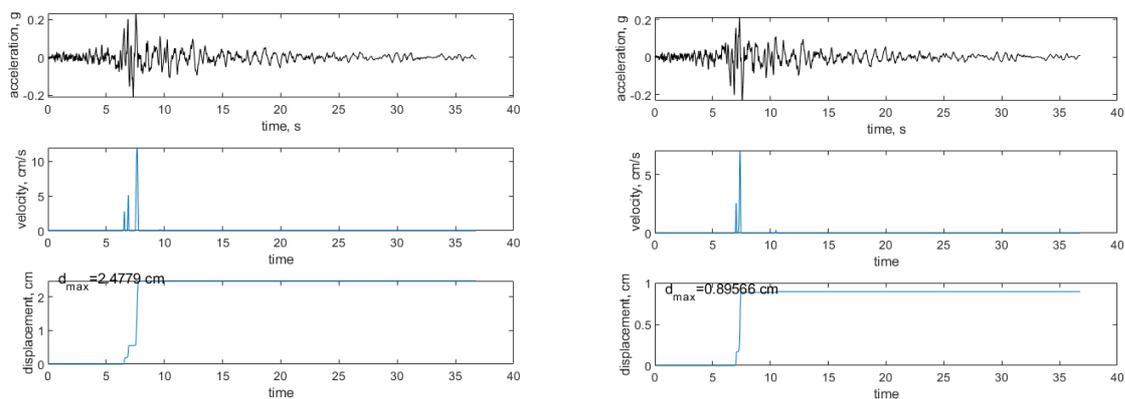


Fig. AP. 2.14. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,1$

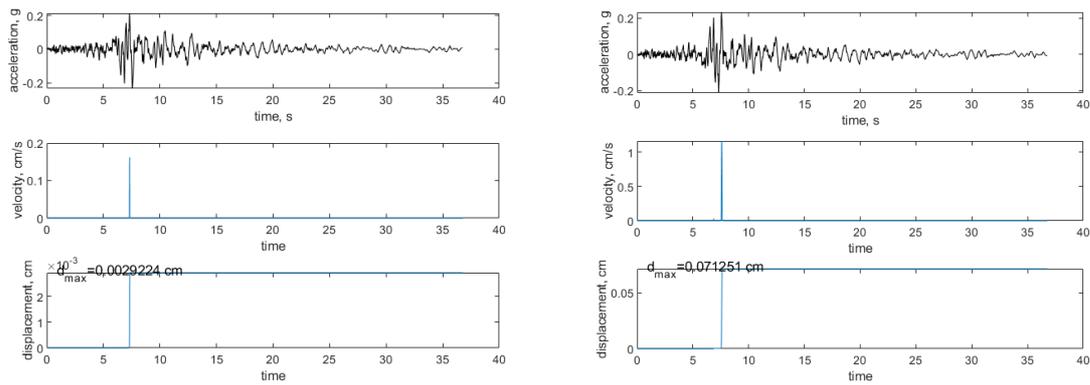


Fig. AP. 2.15. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,2$

Accelerogramma 4

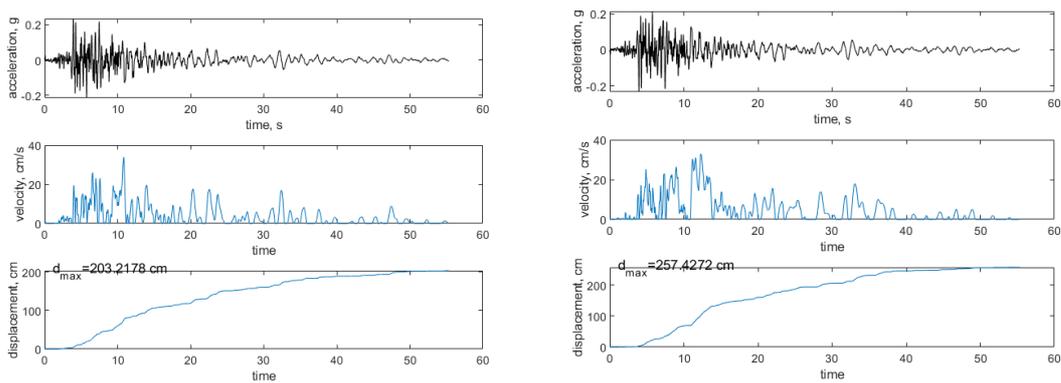


Fig. AP. 2.16. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,005$

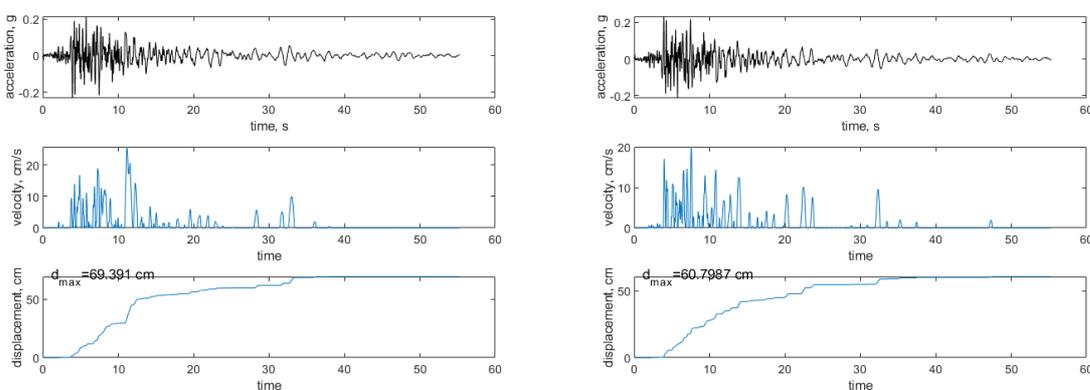


Fig. AP. 2.17. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,02$

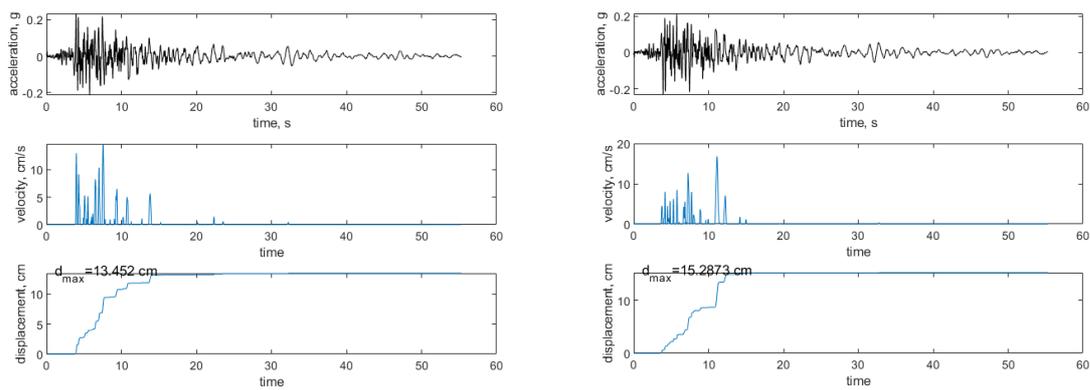


Fig. AP. 2.18. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,05$

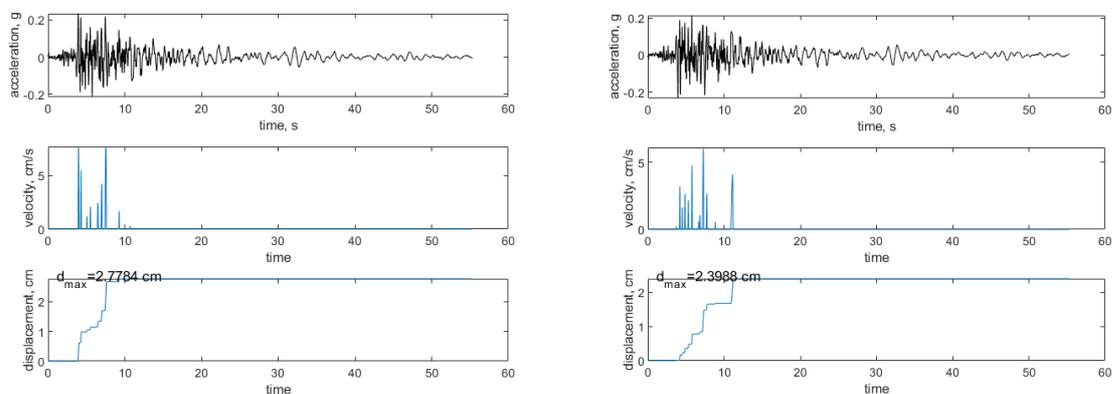


Fig. AP. 2.19. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,1$

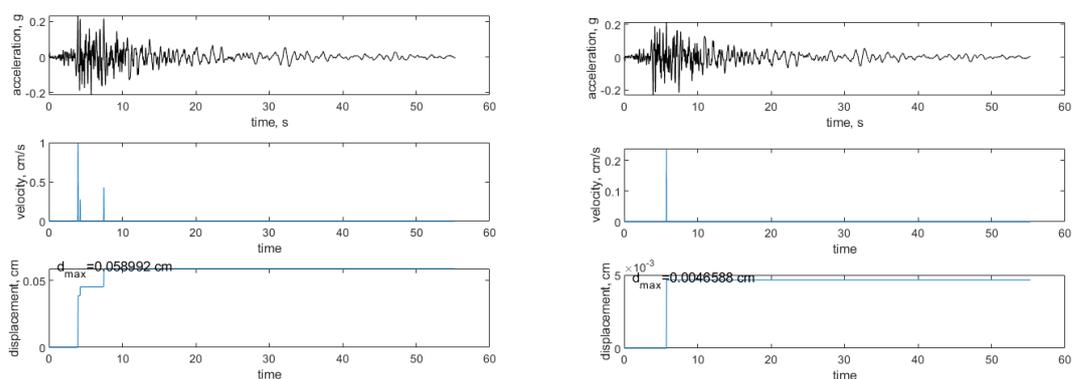


Fig. AP. 2.20. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,2$

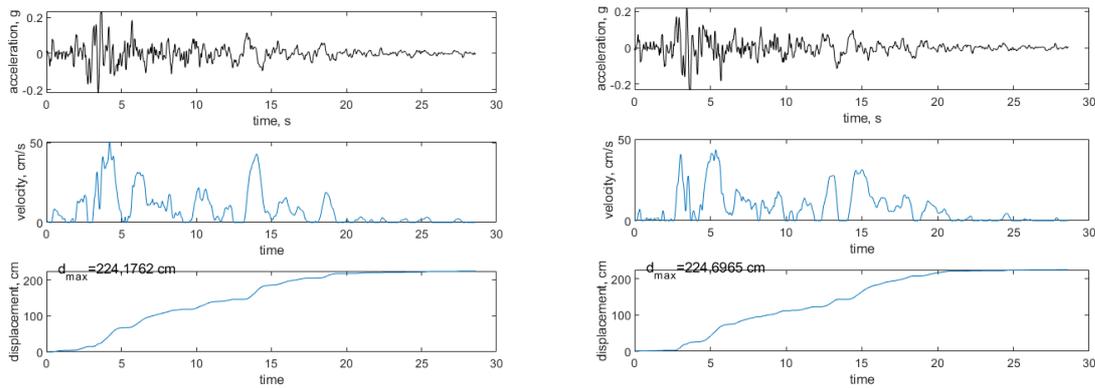
Accelerogramma 5

Fig. AP. 2.21. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,005$

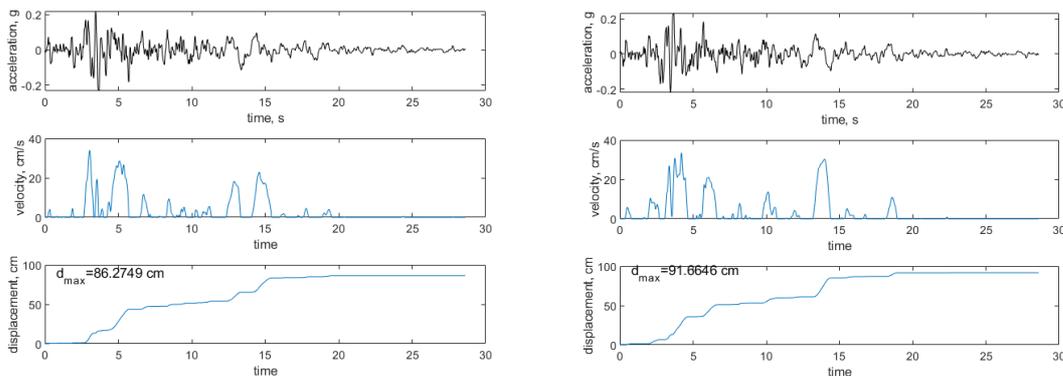


Fig. AP. 2.22. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,02$

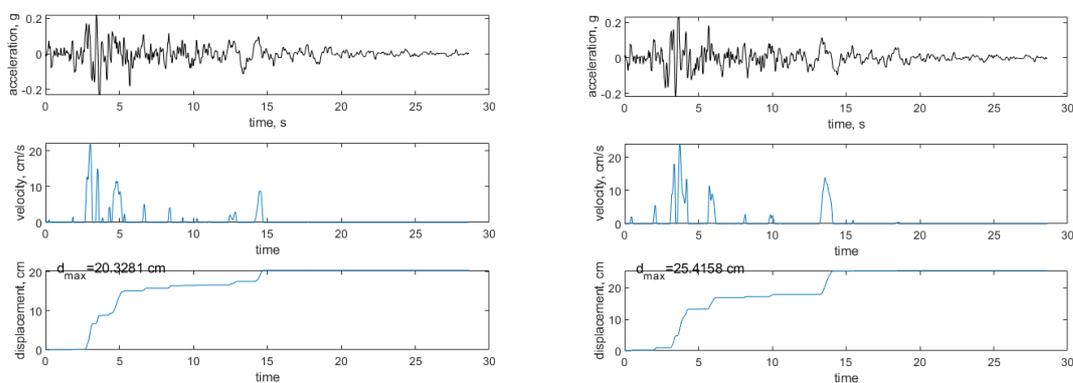


Fig. AP. 2.23. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,05$

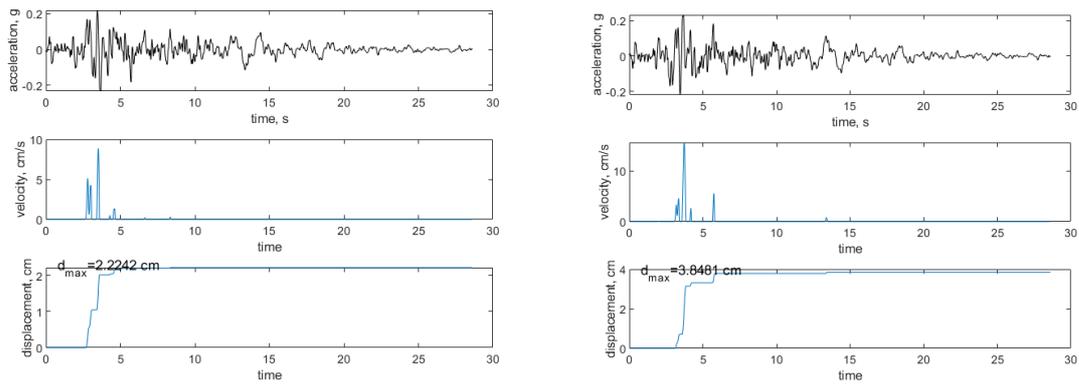


Fig. AP. 2.24. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,1$

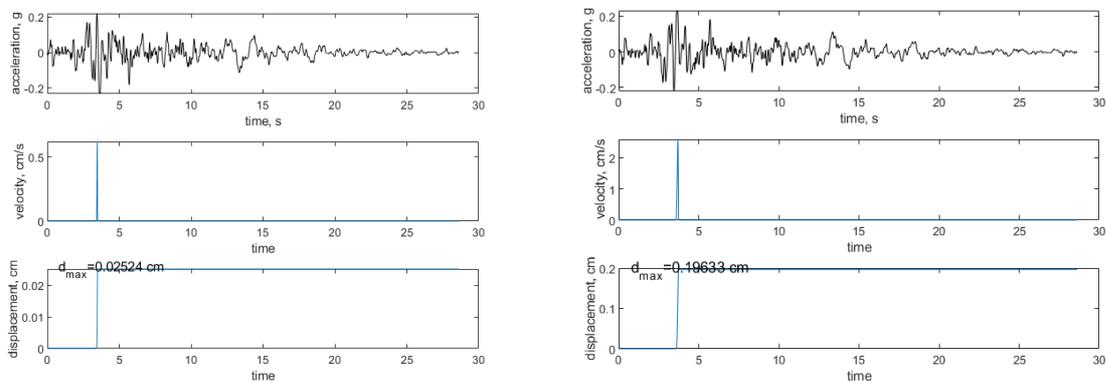


Fig. AP. 2.25. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,2$

### Accelerogramma 6

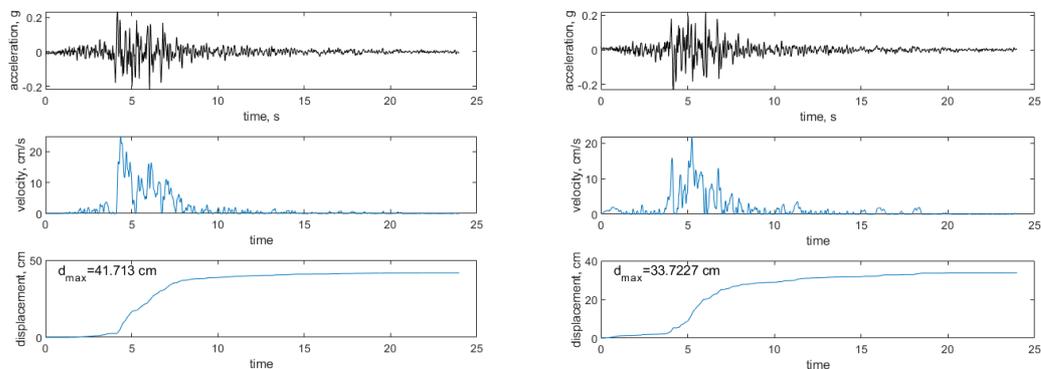


Fig. AP. 2.26. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,005$

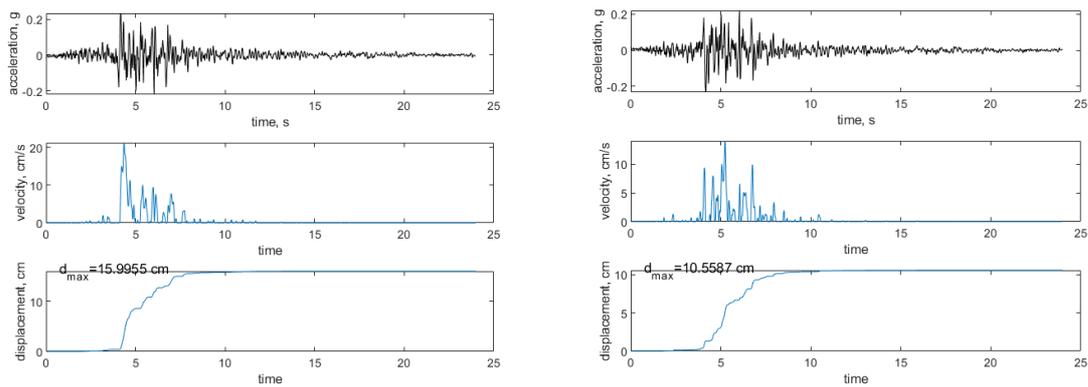


Fig. AP. 2.27. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,02$

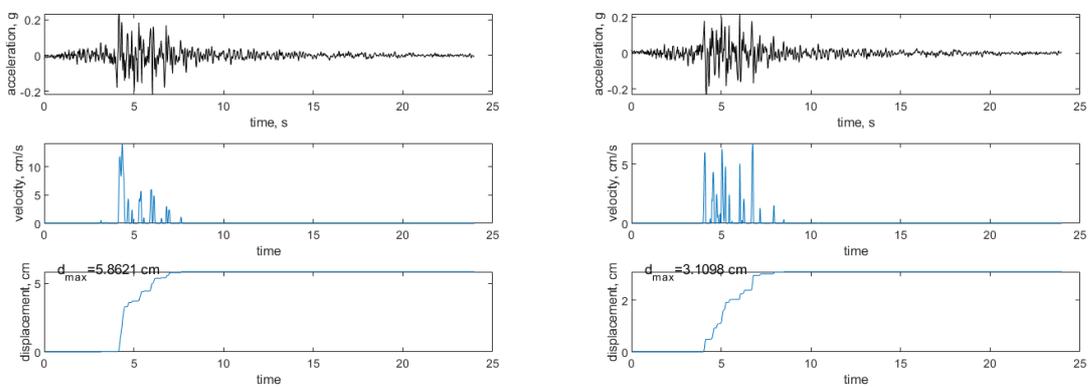


Fig. AP. 2.28. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,05$

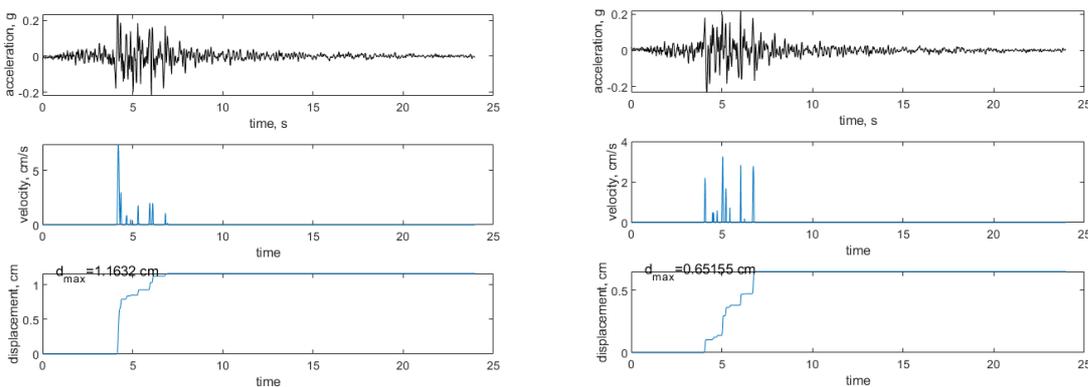


Fig. AP. 2.29. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,1$

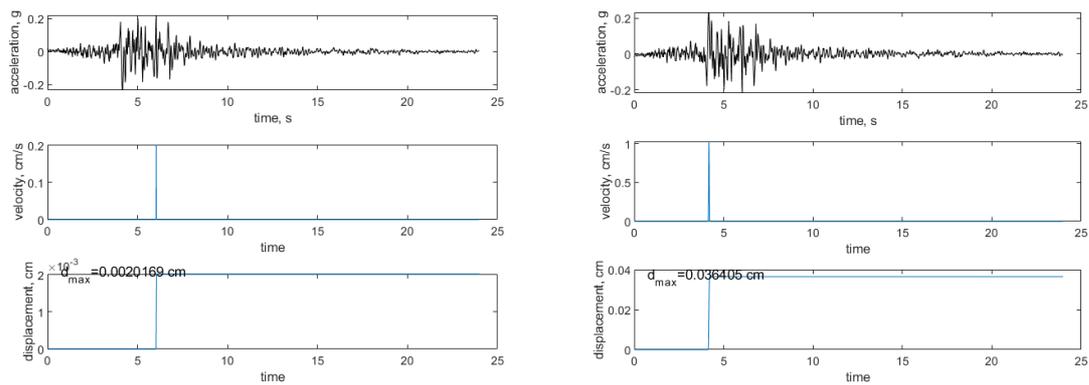


Fig. AP. 2.30. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,2$

Accelerogramma 7

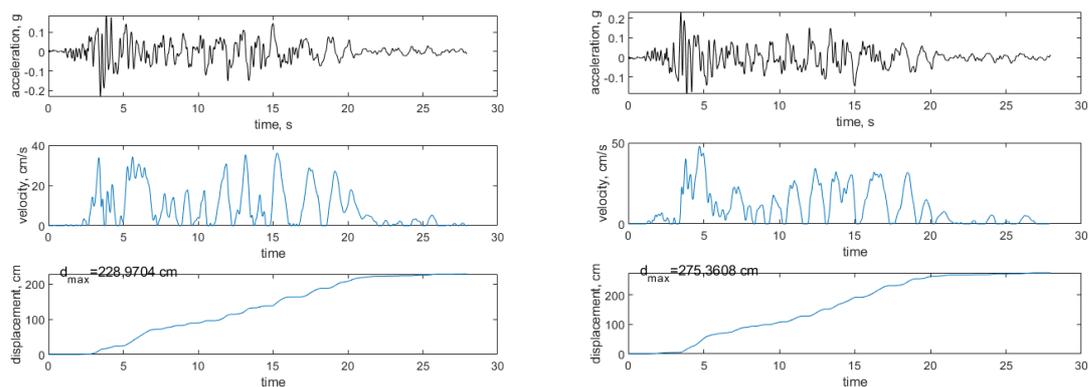


Fig. AP. 2.31. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,005$

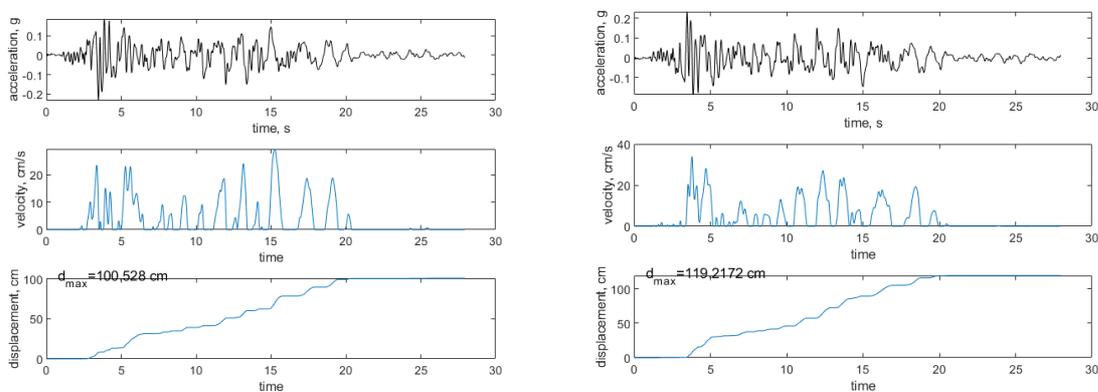


Fig. AP. 2.32. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,02$

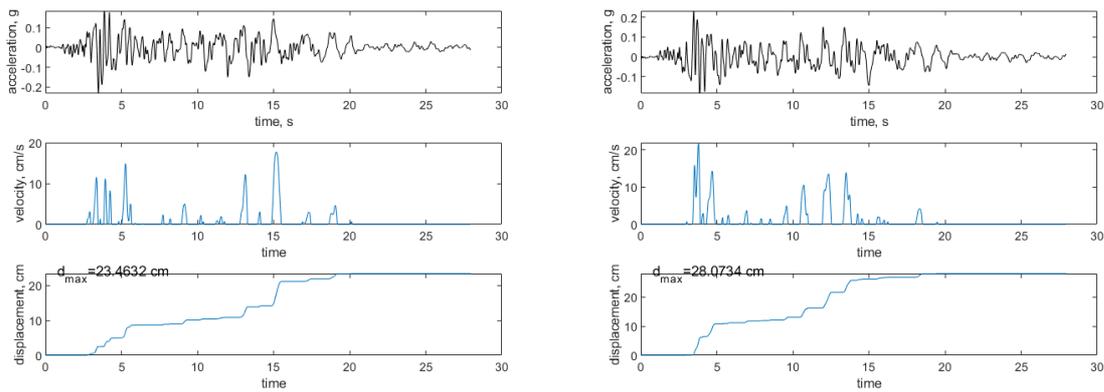


Fig. AP. 2.33. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,05$

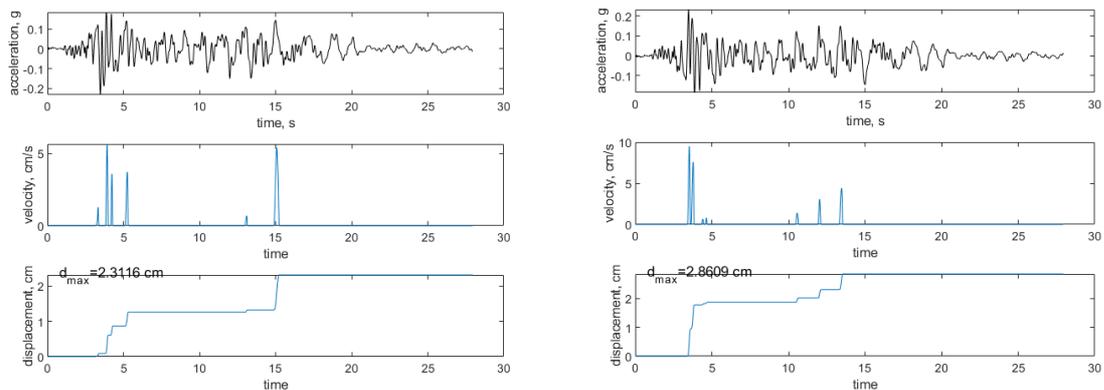


Fig. AP. 2.34. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,1$

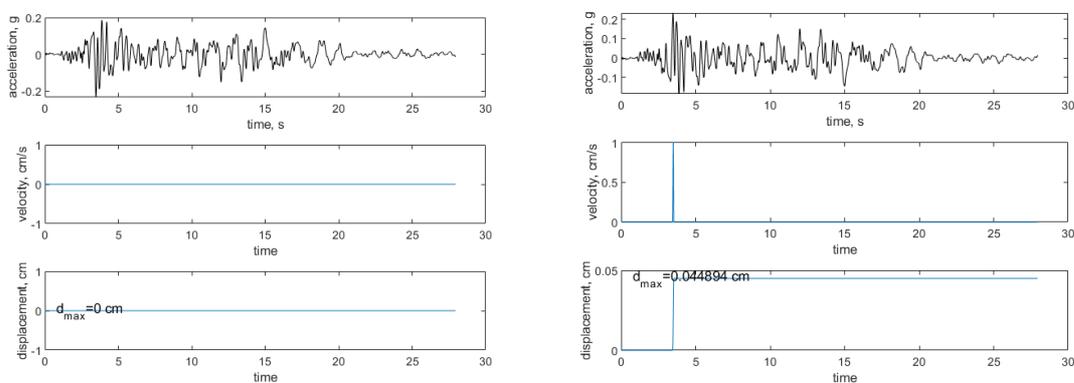


Fig. AP. 2.35. Diagrammi relativi ad accelerazione, velocità e spostamento ricavati con procedura di doppia integrazione del moto sismico, per  $a_{lim} = 0,2$

**BIBLIOGRAFIA**

ANIL K. CHOPRA (2005) - *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*.

AMBRASEYS N.N., MENU J.M. (1988) – *Earthquake - Induced Round Displacement*, Earthquake Engineering And Soil Dynamics, vol. XVI, pp. 985-1006.

BIONDI G., RAMPELLO S., CASCONI E., - *Valutazione del comportamento dei pendii in condizioni simili* - Rivista Italiana di Geotecnica (2011).

BRAY J.D., TRAVASAROU T. (2007) - *Simplified procedure for of earthquake - Induced Deviatoric Slope Displacement*- Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, pp. 381-390.

BRAY J.D., TRAVASAROU T. (2009) – *Pseudostatic Coefficient for Use in Simplified Seismic Slope Stability Evaluation* - Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, technical notes.

BRAMERINI F., CASTENETTO S., GIUFFRÈ M., NASO G., - *Linee Guida per la gestione del territorio in aree interessate da instabilità di versante sismoindotte*, Roma (2017).

CREPELLANI T., FACCIORUSSO J., MADIAI C., VANNUCCHI G. (2003) - *Influence of uncorrected accelerogram processing techniques on Newmark's rigid block displacement evaluation*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, n.23, pp. 415–424.

CREPELLANI T., GHINELLI A., MADIAI C., VANNUCCHI G. (1990) - *Analisi di stabilità dei pendii naturali in condizioni sismiche* - Rivista Italiana di Geotecnica, n. 2, pp. 49-74.

CREPELLANI T., MADIAI C., VANNUCCHI G. (1998) - *Earthquake destructiveness potential factor and slope stability. Géotechnique*, 48, n. 3, pp. 411-419.

DEL FABBRO M., - *Analisi dei pendii in condizioni dinamiche (2009)* - Università degli studi di Udine, Dipartimento di Georisorse e Territorio.

EUROCODE 7: *Geotechnical Design, Progettazione Geotecnica* - Part 1, General Rules, Criteri Generali - UNI ENV 1997-1.

EUROCODE 8 - *Design for structures for earthquakes resistance* - Part 1, General rules, seismic actions and rules for buildings.

FANTI R., - *I fenomeni franosi, descrizione e monitoraggio (2011)* - Università degli studi di Firenze, Dipartimento di Scienze della Terra.

FERRERO A.M., - *Verifiche di Stabilità dei versanti, aspetti teorici e normativi (2011)* - Università degli studi di Parma, Associazione geotecnica italiana AGI, corso di aggiornamento professionale.

FOTI S. - *Dispense del Corso di Geotecnica Sismica (2013)* - Politecnico di Torino.

IERVOLINO I., GALASSO C., COSENZA E., (2008) - *Spettri, accelerogrammi e le nuove norme tecniche per le costruzioni*.

JIBSON R.W. (1993) - *Predicting Earthquake-Induced Landslide Displacements Using Newmark's Sliding Block Analysis* - pp. 9-17.

JIBSON R.W. (2007) – *Regression Models For Estimating coseismic Landslide Displacements* – USGS, U.S. Geological Survey – pp. 210-218.

LINEE GUIDA AGI - *Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica, Stabilità dei pendii e dei fronti di scavo in zona sismica (2008).*

LINEE GUIDA AGI - *Linee guida per la zonazione della suscettibilità, della pericolosità e del rischio di frana ai fini della pianificazione territoriale (2008).*

MADIAI C. - *Correlazioni tra parametri del moto sismico e spostamenti attesi del blocco di Newmark-* Rivista Italiana di Geotecnica (2009), n.1, pp. 23-43.

MADIAI C. - *Dispense del Corso di Ingegneria Sismica (2012)* - Università degli studi di Firenze.

NEWMARK N. (1965) - *Effects of earthquakes on dams and embankments.* Géotechnique 15, n. 2, pp. 139- 160.

NEWMARK N., ROSENBLUETH E., (1971) - *Fundamentals of earthquake engineering* - Prentice-Hall, New York.

NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI (2008) - Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, DM 14 Gennaio 2008, pubblicate sulla *Gazzetta Ufficiale* n. 29 del 4 febbraio 2008 con Supplemento Ordinario n. 30 (cap 6,7, sez. G.2.1., G.2.2.).

OPCM n. 3274, (2003) - *Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici* - Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana,105.

RAMPELLO S., BURGHIGNOLI A., JAMIOLKOWSKI M., RICCI G., VIGGIANI E. (2007) - *Coordinamento Associazione Geotecnica Italiana - Progetto esecutivo 2005-2007 (Linea 6.3 - Stabilità dei pendii)* - Unità di Ricerca dell'Università degli Studi di Firenze.

RAMPELLO S., CALLISTO L. - *Stabilità dei pendii in condizioni sismiche, cap. 9* - Università di Roma "La Sapienza".

RATHJE E.M., ABRAHAMSON N.A., BRAY J.D. (1998) - *Simplified frequency content estimates of earthquake ground motions* - Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. CXXIV, n. 2, pp. 150-159.

#### **WEBSITES**

INGV - *Istituto Nazionale Di Geologia e Vulcanologia* - Zone Sismiche e Mappe di pericolosità sismica di riferimento - <http://zonesismiche.mi.ingv.it/>

INGV - *Istituto Nazionale Di Geologia e Vulcanologia* - Mappe interattive di pericolosità sismica regionale - <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>

ITACA - *Italian Accelerometric Archive (INGV)* - <http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet/>

MATHWORKS - *Matlab Matrix Laboratory* - <https://it.mathworks.com/products/matlab.html>

RELUIS - *REXELite software* – Rete dei Laboratori di Ingegneria Sismica Italiana- Banca dati accelerometrica Europea e Italiana - <http://esm.mi.ingv.it>

SEISMOSOFT - *SeismoSignal Software* - <https://www.seismosoft.com/seismosignal>

SISMA - *Site of Italian Strong Motion Accelerograms* - <http://sisma.dsg.uniroma1.it/>