



**Convenzione tra il Dip.Te.Ris. e il Commissario Delegato Attività post-sisma (Presidente della Giunta Regionale – Regione Molise)**

**CONSIDERAZIONI GENERALI E METODOLOGICHE  
PROPEDEUTICHE AGLI STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA  
PER I COMUNI DELLA PROVINCIA DI CAMPOBASSO**

*RESPONSABILE SCIENTIFICO:* **PROF. CLAUDIO EVA**

*A CURA DI:* **S. BARANI, R. DE FERRARI, C. EVA, G. FERRETTI**

**OTTOBRE 2007**



## INDICE

<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>3</b>
<b>1 ANALISI DI PERICOLOSITA' SISMICA</b> .....	<b>4</b>
1.1 CATALOGO DEI TERREMOTI .....	5
1.2 ZONAZIONE SISMOGENETICA .....	6
1.3 PARAMETRI DI SISMICITA' E MAGNITUDO MASSIMA .....	6
1.4 ATTENUAZIONE DELLO SCUOTIMENTO SISMICO.....	7
1.5 METODO DI CORNELL .....	9
1.6 SPETTRI DI RISPOSTA A PERICOLOSITA' UNIFORME CON PROBABILITA' DI ECCEDENZA DEL 10% IN 50 ANNI.....	10
1.6.1 Comuni in Zona 1 .....	12
1.6.2 Comuni in Zona 2A .....	13
1.6.3 Comuni in Zona 2B EST.....	15
1.6.4 Comuni in Zona 2B NORD .....	16
1.6.5 Comuni del Cratere.....	17
1.6.6 Comuni in Zona 3 .....	19
<b>2 DEFINIZIONE DELL'INPUT SISMICO</b> .....	<b>21</b>
2.1 CONSIDERAZIONI SULLA SCELTA DEGLI ACCELEROGRAMMI .....	21
2.2 DISAGGREGAZIONE DELLA PERICOLOSITA' SISMICA.....	22
2.3 SELEZIONE DEGLI ACCELEROGRAMMI E CARATTERIZZAZIONE DELL'INPUT SISMICO SU ROCCIA .....	23
2.3.1 Comuni in Zona 1 .....	24
2.3.2 Comuni in Zona 2A .....	26
2.3.3 Comuni in Zona 2B EST.....	29
2.3.4 Comuni in Zona 2B Nord .....	31
2.3.5 Comuni del Cratere.....	33
2.3.6 Comuni in Zona 3 .....	35
<b>3 DETERMINAZIONE DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE E MICROZONAZIONE SISMICA (VALUTAZIONE DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE)</b> .....	<b>38</b>
3.1 CARATTERIZZAZIONE DEI MODELLI DELLE COLONNE STRATIGRAFICHE .....	39
3.2 DEFINIZIONE DEGLI EFFETTI DI AMPLIFICAZIONE SISMICA LOCALE 1D.....	46



<b>3.3</b>	<b>STIMA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE .....</b>	<b>48</b>
	<b><i>CONCLUSIONI.....</i></b>	<b>52</b>
	<b><i>APPENDICE.....</i></b>	<b>53</b>
	<b><i>BIBLIOGRAFIA.....</i></b>	<b>55</b>

## INTRODUZIONE

Le linee guida stabilite all'interno del Bollettino Ufficiale della Regione Molise per la microzonazione sismica (Decreto del 6 Agosto 2003) hanno permesso di organizzare in modo ottimale l'attività di ricerca per la definizione dei valori di scuotimento attesi e per la stima dei fattori di amplificazione legati alle condizioni locali a scala comunale.

In questa relazione, redatta presso il Dip.Te.Ris. (Dipartimento per lo studio del Territorio e delle sue Risorse) – Università di Genova, vengono riportati gli aspetti metodologici che hanno portato all'ottenimento dei risultati relativi all'analisi di risposta sismica locale relativa ai Comuni della Provincia di Campobasso.

Ai fini dell'analisi dei fattori di amplificazione locale utili per la redazione di carte di microzonazione sismica si è reso necessario innanzitutto definire l'input sismico utile alle modellazioni numeriche. Pertanto, è stata condotta un'analisi probabilistica di pericolosità sismica (Probabilistic Seismic Hazard Analysis – PSHA) (Capitolo 1) allo scopo di definire i valori di accelerazione spettrale (spettri isoprobabili), comprensivi del valore di accelerazione orizzontale di picco ( $a_g$ ), con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (Periodo di Ritorno  $R_P = 475$  anni). Successivamente, sulla base delle informazioni fornite dalle indagini geologiche e geotecniche effettuate in diverse campagne di misura e a seguito di analisi numeriche mono-dimensionali (1D), sono stati determinati i valori della frequenza fondamentale e il livello di amplificazione di ciascuna situazione locale analizzata all'interno dell'area comunale.

Nel Capitolo 2 viene sinteticamente descritto l'approccio adottato per l'analisi di disaggregazione della pericolosità e per la successiva definizione dell'input sismico (insieme di accelerogrammi su roccia da utilizzare per il calcolo dei fattori di amplificazione locale).

Infine, nel Capitolo 3 viene presentata la procedura implementata per lo studio di microzonazione sismica mirata alla definizione degli effetti di amplificazione sismica locale attraverso metodi di simulazione numerica 1D.

Nelle relazioni redatte per ciascun Comune vengono riportati i valori di  $a_g$  di ancoraggio dello spettro di risposta elastico con probabilità di superamento del 10% in 50 anni (confrontabile con i valori riportati nella tabella allegata alla Deliberazione della Giunta Regionale (Regione Molise) n. 1171 del 2 agosto 2006) e i fattori di amplificazione correttivi definiti sulla base delle condizioni locali, utilizzabili per definire le mappe di microzonazione a livello comunale.

I fattori di amplificazione, calcolati a seguito delle analisi numeriche, possono essere impiegati come termini correttivi da inserire all'interno della procedura suggerita dalla Normativa Sismica Italiana per la definizione degli spettri di risposta elastici.

## 1 ANALISI DI PERICOLOSITA' SISMICA

La pericolosità sismica dell'intero territorio nazionale è stata determinata con l'Ordinanza P.C.M. n. 3274 del 20 Marzo 2003 secondo cui i Comuni della Provincia di Campobasso rientrano in Zona sismica 1, 2 e 3. Più recentemente l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) ha rideterminato, utilizzando metodologie più attuali e riproducibili (come previsto dall'Ordinanza), la pericolosità sismica del territorio nazionale (Gruppo di Lavoro MPS, 2004). Pur in modo non esplicito, la Regione (in base alla tabella allegata alla Deliberazione della Giunta Regionale (Regione Molise) n. 1171 del 2 agosto 2006) ha tenuto conto delle risultanze della nuova zonazione sismica redatta dall'INGV.

Nonostante ciò, al fine di fornire risultati locali in termini di spettri di risposta elastici a pericolosità uniforme (Uniform Hazard Spectra o spettri isoprobabili) relativi ad un periodo di ritorno di 475 anni nonché per poter eseguire la disaggregazione della pericolosità si è reso necessario il ricalcolo della pericolosità sismica dei siti d'interesse. Gli spettri, calcolati per sito in roccia, sono stati considerati quali riferimento per la caratterizzazione dell'input sismico per ciascun sito.

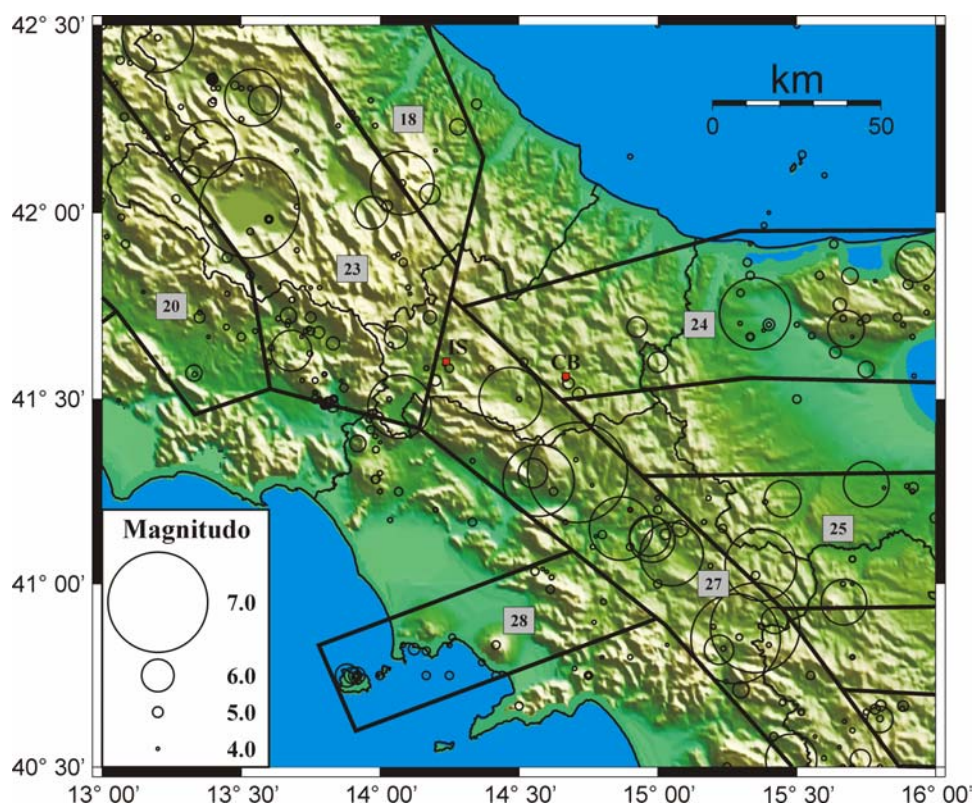
Il calcolo della pericolosità sismica di un sito o di un'area secondo l'approccio probabilistico classico (Cornell, 1968; Reiter, 1991) prevede:

- 1) la caratterizzazione geometrica di uno o più modelli sismogenetici;
- 2) la determinazione del tasso di occorrenza dei terremoti al di sopra di una data soglia di magnitudo per ciascuna sorgente sismogenetica;
- 3) l'impiego di relazioni di attenuazione che descrivano l'ampiezza dello scuotimento in funzione della grandezza del terremoto, espressa in termini di magnitudo o di intensità, e della distanza sorgente-sito (es. epicentrale, ipocentrale);
- 4) la valutazione della probabilità di eccedenza di prefissati valori di scuotimento.

Nei paragrafi successivi sono descritti i parametri ed i modelli adottati per la valutazione della pericolosità sismica dei Comuni d'interesse. Non volendo in alcun modo criticare o modificare i risultati proposti nella mappa presentata dall'INGV (Gruppo di Lavoro MPS, 2004), già approvati dalla Commissione Grandi Rischi del Dipartimento della Protezione Civile, onde evitare la possibilità di trovare delle forti discrepanze con quanto già proposto si è operato utilizzando gli stessi dati di input e le stesse procedure di calcolo.

## 1.1 CATALOGO DEI TERREMOTI

Per la caratterizzazione regionale della sismicità si è utilizzato il catalogo parametrico dei terremoti italiani CPTI04 (Gruppo di lavoro CPTI, 2004), compilato opportunamente per la redazione della recente mappa di pericolosità sismica italiana (Gruppo di lavoro MPS, 2004). Il catalogo in esame, che costituisce un'evoluzione ed un aggiornamento del catalogo CPTI99 (Gruppo di Lavoro CPTI, 1999), comprende una finestra temporale che si estende dall'anno 217 a.C. al 2002 d.C. Alle sezioni ante 1000 e 1000-1980 sono state apportate alcune modifiche rispetto ai cataloghi precedenti, di cui le salienti sono: determinazione della magnitudo momento,  $M_w$ , e della magnitudo  $M_{sp}$  (necessaria per il corretto impiego della relazione di attenuazione di Sabetta e Pugliese), l'aggiornamento e il completamento per i periodi 1981-2002. In conformità con il modello di Poisson, il catalogo non contiene eventi definibili come repliche e precursori. Per quanto concerne le soglie di magnitudo, il catalogo CPTI04 eredita per le finestre pre-1980 la soglia minima dei cataloghi NT4.1 (Camassi e Stucchi, 1997) e CPTI99 da cui è derivato e contiene solo eventi con magnitudo  $M_s \geq 4.0$ , dove  $M_s$  è la magnitudo calcolata dalle onde superficiali. Per le sezioni post-1980 si è adottata, con l'eccezione della zona etnea, una soglia minima di magnitudo leggermente superiore ( $M_s \geq 4.15$ ).



**Figura 1** Distribuzione della sismicità nell'area di studio. Eventi contenuti nel catalogo CPTI04 (Gruppo di lavoro CPTI, 2004). Sovrapposizione della zonazione sismogenetica ZS9 (Gruppo di lavoro MPS, 2004).

In figura 1 è illustrata la distribuzione della sismicità per l'area molisana. Da essa risulta evidente come la distribuzione degli epicentri corrisponda ad una sismicità regionale diffusa con la presenza non trascurabile di terremoti aventi magnitudo  $M_s > 6.0$  (Molise 05/12/1456  $M_s = 6.7$ ; Matese 05/06/1688  $M_s = 7.3$ ; Matese 26/07/1805  $M_s = 6.7$ ; Sannio 21/08/1962  $M_s = 6.2$ ).

## 1.2 ZONAZIONE SISMOGENETICA

Una zona sismogenetica rappresenta il contour della proiezione in superficie di tutte le strutture considerate sorgenti di terremoti ad alta e bassa energia: essa contiene quindi sia segmenti di faglie maggiori sia di faglie minori. Nelle valutazioni di pericolosità sismica basate su un approccio di tipo probabilistico le zone sismogenetiche sono assunte quali aree caratterizzate da sismicità uniforme. Esse sono pertanto zone omogenee dal punto di vista del potenziale di generazione dei terremoti in quanto si assume che gli eventi sismici possano verificarsi in ogni punto di una stessa zona con la stessa probabilità.

Ai fini di questo studio è stata adottata acriticamente la zonazione sismogenetica ZS9 recentemente sviluppata dal Gruppo di Lavoro MPS (2004) ed impiegata per la redazione della nuova mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale. Le zone che interessano maggiormente l'area di studio sono mostrate nella figura 1 sovrapposte alla distribuzione degli epicentri riportati nel catalogo CPTI04.

La ZS9 contempla 36 zone sismogenetiche ed è stata sviluppata a partire dalla precedente zonazione ZS4 (Meletti et al., 2000) seguendo l'approccio cinematico di Scandone et al. (1990). In particolare, rispetto a ZS4 sono stati apportati rilevanti cambiamenti per tener conto delle più recenti conoscenze sulla tettonica attiva e sulla distribuzione delle sorgenti sismogenetiche, superando il problema delle ridotte dimensioni delle zone sorgenti e del conseguente numero limitato di terremoti in ciascuna di esse. ZS9, inoltre, fornisce per ciascuna zona sismogenetica una stima della profondità media dei terremoti e un meccanismo di fagliazione prevalente.

Ai fini del presente lavoro sono state considerate tutte le zone giudicate influenti sulla pericolosità sismica dei Comuni molisani.

## 1.3 PARAMETRI DI SISMICITA' E MAGNITUDO MASSIMA

La sismicità di una regione o porzione di territorio viene tipicamente rappresentata attraverso la relazione frequenza-magnitudo di Gutenberg e Richter (Gutenberg e Richter, 1944) che fornisce il tasso medio annuale di eccedenza  $\lambda_m$  di eventi sismici aventi magnitudo maggiore o uguale a  $m$ :

$$\log \lambda_m = a - bm$$

dove i coefficienti  $a$  e  $b$  rappresentano rispettivamente la sismicità totale della regione a cui essa è riferita ( $10^a$  definisce l'accadimento annuo medio di terremoti aventi magnitudo maggiore o uguale a zero) e la frequenza relativa di accadimento dei terremoti più forti (più sporadici) rispetto a quelli più deboli (più frequenti).

Per ciascuna zona sismogenetica, tenendo conto della completezza del catalogo dei terremoti, sono stati ricavati i parametri  $a$  e  $b$  della legge di Gutenberg-Richter impiegando il metodo proposto da Weichert (1980) basato sul principio della massima verosimiglianza (maximum likelihood estimation).

Poiché gli effetti di terremoti deboli risultano influenti ai fini ingegneristici, gli eventi sismici inferiori a una certa soglia di magnitudo  $m_0$  (es.  $m_0 = 4.0, 5.0$ ) sono trascurati. Allo stesso modo, poiché la legge Gutenberg-Richter prevede un tasso medio annuo di eccedenza  $\lambda_m$  non nullo anche per eventi sismici di magnitudo infinita, è possibile imporre un limite superiore,  $M_{\max}$ , alla distribuzione frequenza-magnitudo. L'espressione analitica della relazione di Gutenberg-Richter troncata superiormente e inferiormente è esprimibile come segue (McGuire e Arabazs, 1990):

$$\lambda_m = \nu \frac{e^{[-\beta(m-m_0)]} - e^{[-\beta(M_{\max}-m_0)]}}{1 - e^{[-\beta(M_{\max}-m_0)]}} \quad m_0 \leq m \leq M_{\max}$$

dove  $\nu = \exp(\alpha - \beta m_0)$ ,  $\alpha = a \cdot \ln(10)$  e  $\beta = b \cdot \ln(10)$ .

Il valore di magnitudo massima,  $M_{\max}$ , rappresenta un termine cautelativo che viene adottato per garantire le determinazioni di accelerazione massima dalla possibilità che occorranzo eventi di magnitudo superiore a quelle incluse nel catalogo. Per questo motivo, spesso, la differenza tra il valore massimo adottato e quello proposto dal catalogo può risultare molto elevata. Nel presente studio, per ogni zona sismogenetica, i valori di magnitudo massima sono stati stimati impiegando una procedura iterativa basata sull'estrapolazione della relazione log-lineare di Gutenberg-Richter. La curva frequenza-magnitudo è troncata in corrispondenza del tasso medio di eccedenza a cui corrisponde il valore di magnitudo massima,  $M_{\max}$ , che fornisce il best-fit dei tassi di sismicità.

#### 1.4 ATTENUAZIONE DELLO SCUOTIMENTO SISMICO

Le relazioni predittive del moto sismico o relazioni di attenuazione sono leggi empiriche che definiscono le modalità con cui i parametri dello scuotimento sismico variano in funzione della distanza sorgente-sito, della magnitudo ed eventualmente altri parametri relativi alle caratteristiche del suolo e/o al meccanismo di sorgente.

Per analogia con quanto fatto da parte del Gruppo di Lavoro MPS04 per la determinazione della pericolosità sismica nazionale, sono state utilizzate le relazioni di attenuazione di Ambraseys et al. (1996) e Sabetta e Pugliese (1996). In questo studio lo scuotimento atteso è stato valutato in termini



di accelerazione spettrale  $Sa$  (g) (l'accelerazione spettrale coincide con il picco di accelerazione orizzontale,  $a_g$ , per il periodo  $T=0$  s) con riferimento a suolo rigido o roccia. Poiché le leggi di attenuazione adottate nel presente studio non considerano il meccanismo di fagliazione, ovvero predicono lo scuotimento in funzione dei soli parametri magnitudo e distanza, queste sono state corrette impiegando i fattori moltiplicativi proposti da Bommer et al. (2003). Si ricorda, che tali fattori correttivi sono stati adottati anche nell'ambito della redazione della mappa di pericolosità sismica italiana (Gruppo di Lavoro MPS, 2004).

#### **- Relazione di attenuazione di Ambraseys et al. (1996)**

La relazione di Ambraseys et al. (1996) è calibrata su un database di 157 terremoti registrati principalmente in Europa Meridionale e Medio Oriente (tra cui i terremoti di area italiana: Friuli 1976; Valnerina 1979, Irpinia 1980, Gubbio 1984), aventi magnitudo  $M_s$  compresa tra 4.0 e 7.9 e profondità focale inferiore o uguale a 30 km. Per gli eventi più forti ( $M_s > 6.0$ ) la distanza sorgente-sito,  $d$  (km), è definita come la minore distanza tra il sito e la proiezione in superficie del piano di faglia, mentre per piccole magnitudo associate a terremoti crostali tale distanza è approssimabile a quella epicentrale. I suoli vengono differenziati in tre categorie in base al valore della velocità delle onde di taglio mediata entro i primi 30 metri di profondità,  $V_{S,30}$ : *rock* per  $V_{S,30} > 750$  m/s, *stiff soil* per  $V_{S,30}$  comprese tra 360 e 750 m/s e *soft soil* per  $V_{S,30}$  comprese tra 180 e 360 m/s.

Con riferimento al parametro di scuotimento impiegato nel presente studio (accelerazione spettrale) e per terreni tipo rock, la relazione di attenuazione di Ambraseys et al. (1996) assume l'espressione:

$$\log (Sa) = C_1 + C_2 M_s + C_4 \log (d^2 + h^2)^{0.5}$$

dove  $C_1$   $C_2$   $C_4$ ,  $h$  sono coefficienti empirici dipendenti dal periodo spettrale considerato.

#### **- Relazione di attenuazione di Sabetta e Pugliese (1996)**

La banca dati utilizzata comprende registrazioni relative a 17 terremoti italiani a cui sono stati applicati i seguenti criteri di selezione:

- inclusione di soli terremoti aventi magnitudo locale  $M_l > 4.5$  registrati almeno da due stazioni;
- inclusione di soli terremoti i cui epicentri sono stati determinati con una incertezza inferiore ai 5 km;
- inclusione di soli terremoti le cui magnitudo sono state determinate con un'incertezza inferiore a 0.3 unità;
- inclusione di registrazioni provenienti da stazioni "free-field".

I terreni sono classificati in tre classi in funzione di dati geotecnici, geologici e dello spessore dei depositi,  $H$ : terreni rigidi, alluvioni superficiali ( $H \leq 20$  m) e alluvioni profonde ( $H \geq 20$  m). I suoli alluvionali sono caratterizzati un valor medio della velocità delle onde di taglio compresa tra 400 e 800m/s mentre i suoli rigidi da valori di  $V_s > 800$ m/s.

L'espressione analitica della relazione di attenuazione di Sabetta e Pugliese (1996) per scuotimento espresso in termini di  $Sa$  e terreni rigidi assume la forma:

$$\log (Sa) = a + b M_{sp} + c \log (r^2 + h^2)^{0.5}$$

dove  $a, b, c, h$  sono coefficienti empirici dipendenti dal periodo spettrale considerato,  $M_{sp}$  coincide con  $M_s$  per terremoti con  $M_s > 5.5$  ed  $M_l$  per terremoti più deboli ( $M_l < 5.5$ ) e  $r$  è la distanza sorgente-sito (la relazione contempla sia la distanza epicentrale che quella dalla faglia).

## 1.5 METODO DI CORNELL

Il metodo impiegato per la valutazione della pericolosità sismica secondo l'approccio probabilistico è quello standard proposto da Cornell (Cornell, 1968), già descritto per quanto riguarda le fasi di calcolo nell'introduzione al calcolo della pericolosità sismica. Mediante tale metodo sono stati determinati gli spettri di risposta probabilistici a pericolosità uniforme relativi al periodo di ritorno 475 anni (probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni).

Lo scuotimento è stato stimato in termini di accelerazione spettrale impiegando entrambe le relazioni di attenuazione di Sabetta e Pugliese (1996) e di Ambraseys et al. (1996) per terreni rigidi e rock rispettivamente.

L'analisi di pericolosità sismica determina la frequenza annua di eccedenza,  $\lambda_{y^*}$ , di determinati valori di scuotimento  $y^*$  (per es.  $a_g$  oppure una ordinata spettrale). Il reciproco di  $\lambda_{y^*}$  è il periodo di ritorno.

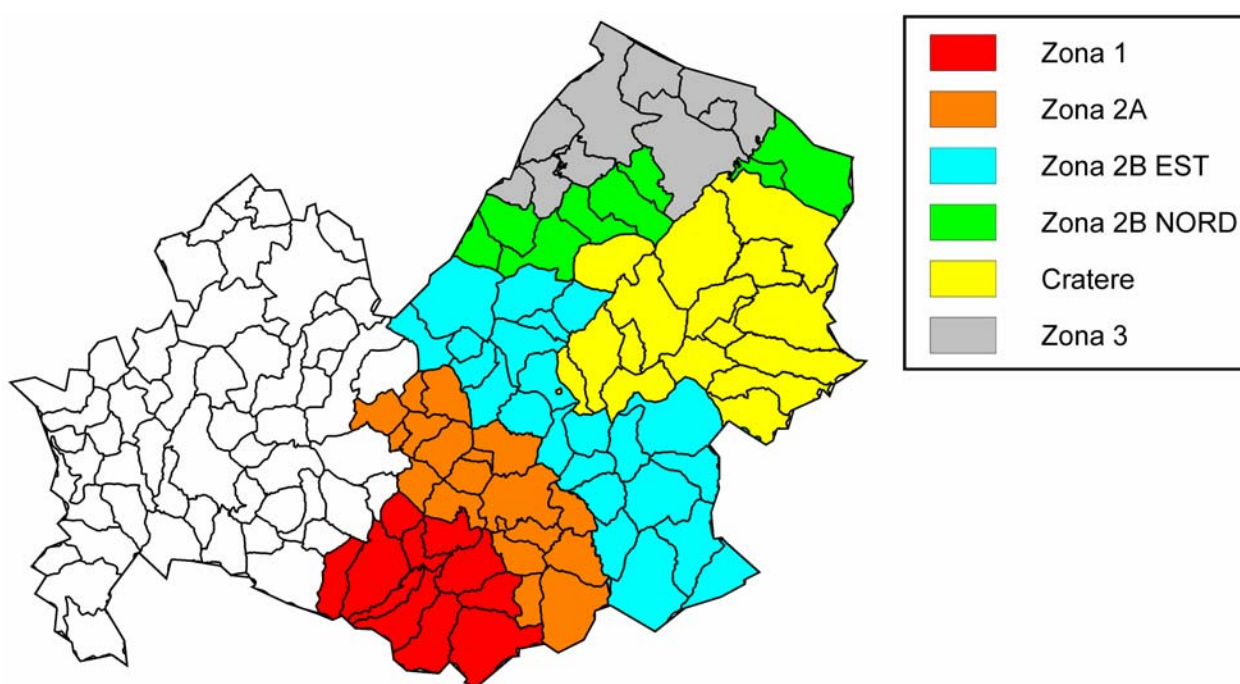
Per sorgenti di tipo areale (come nel caso della ZS9):

$$\lambda_{y^*} = \sum_{i=1}^{N_s} \nu_i \iiint P[Y > y^* | m, r, \varepsilon] f_{M,R}(m, r) f_{\varepsilon}(\varepsilon) dm dr d\varepsilon$$

dove  $N_s$  è il numero di zone sismogenetiche,  $\nu_i [= \exp(\alpha_i - \beta_i m_0)]$  è il tasso di terremoti con magnitudo maggiore o uguale alla soglia minima  $m_0$  per la sorgente  $i_{th}$ ,  $P[Y > y^* | m, r, \varepsilon]$  è la probabilità che un valore  $Y$  del parametro di scuotimento prescelto superi un dato valore  $y^*$  per un terremoto di magnitudo  $m$  a distanza  $r$  e numero,  $\varepsilon$ , di deviazioni standard per cui lo scuotimento devia dal valore mediano predetto dalla legge di attenuazione dati  $m$  e  $r$ ,  $f_{M,R}(m, r)$  è la funzione densità di probabilità della magnitudo e della distanza e  $f_{\varepsilon}(\varepsilon)$  è la funzione densità di probabilità relativa ad  $\varepsilon$ .

## 1.6 SPETTRI DI RISPOSTA A PERICOLOSITÀ UNIFORME CON PROBABILITÀ DI ECCEDEXENZA DEL 10% IN 50 ANNI

Il calcolo dei valori di  $S_a$  per il periodo di ritorno di 475 anni è stato eseguito per tutti i Comuni della Provincia di Campobasso per i quali è stato quindi definito il corrispondente spettro di risposta probabilistico a pericolosità uniforme per i 16 periodi spettrali elencati di seguito: 0.0, 0.05, 0.10, 0.13, 0.15, 0.20, 0.25, 0.29, 0.40, 0.50, 0.60, 0.75, 1.00, 1.30, 1.50, 2.00s. Gli spettri di risposta si riferiscono ad un coefficiente di smorzamento (damping)  $\xi$  pari al 5%.



**Figura 2** Classificazione dei Comuni della Provincia di Campobasso. Tra i Comuni del “cratere” sono stati inclusi quelli di Guardialfiera e San Martino in Pensilis.

Nei paragrafi successivi sono descritti gli spettri isoprobabili distintamente per i Comuni classificati in Zona sismica 1, 2, e 3.

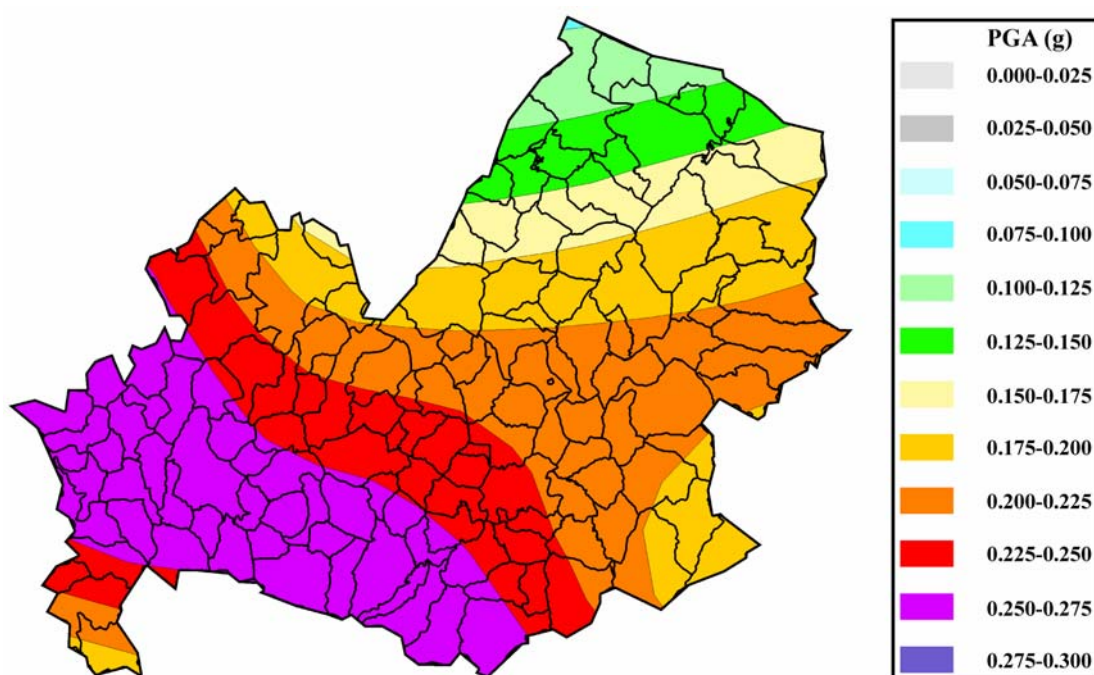
Al fine del calcolo dell’input sismico (Capitolo 2), che richiede una selezione di accelerogrammi reali, i Comuni della Provincia di Campobasso sono stati raggruppati in base alla loro pericolosità (figura 3 come da elaborati del Gruppo di Lavoro MPS, 2004) ed alla loro vicinanza alle sorgenti sismiche presenti nel territorio. In tal modo, mentre per tutti i Comuni in I e III fascia è stato agevole considerare un’unica zona, i Comuni in Zona 2 hanno richiesto una suddivisione nelle seguenti quattro sottozone: Zona del “cratere”, a cui era stata data la precedenza ed è stata considerata a parte; Zona 2A comprendente i Comuni più prossimi alla Zona 1; Zona 2B Est

comprendente i Comuni che bordano l'area occidentale del “cratere”; Zona 2B Nord che borda la parte settentrionale della zona del “cratere”. Tutti i Comuni della Zona 2B Nord, qualora ci si avvalsesse della facoltà di ridurre di 0.025g il valore di  $a_g$  in base al disposto contenuto alla lettera e) del par. 1A dell'Ordinanza PCM n.3519, 28 Aprile 2006, potrebbero rientrare in Zona sismica 3.

La definizione di tali sub-zone non deve considerarsi come una proposta di riclassificazione del territorio, ma è stata introdotta allo scopo di ottenere gruppi di Comuni aventi spettri di risposta a pericolosità uniforme con forme spettrali simili ovvero con pericolosità sismica dominata da un terremoto di scenario comune (si veda Par. 2.2).

Si ricorda che alla Zona del “cratere” fanno parte i Comuni (Bonefro, Casacalenda, Castellino del Biferno, Collotorto, Larino, Montelongo, Montorio nei Frentani, Morrone del Sannio, Provvidenti, Ripabottoni, Rotello, San Giuliano di Puglia, Santa Croce di Magliano Ururi) maggiormente colpiti dal terremoto del 31 Ottobre 2002.

Infine, come descritto di seguito (Par. 1.7.5), per i Comuni di Guardialfiera e San Martino in Pensilis, che in base al documento del Gruppo di Lavoro MPS (2004) presentano i più bassi valori di PGA, si assumerà quale input sismico quello definito per i Comuni del “cratere”.



**Figura 3** Mappa di pericolosità sismica della Regione Molise (Gruppo di Lavoro MPS, 2004): valori di PGA con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (periodo di ritorno: 475 anni).

### 1.6.1 COMUNI IN ZONA 1

In tabella 1 sono riportati i valori di  $a_g$  (picco di accelerazione orizzontale con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni) calcolati dal Gruppo di Lavoro MPS (2004) per tutti i Comuni classificati in Zona 1, così come derivati dalla tabella allegata al decreto del P.G.R. – commissario delegato – n. 74 del 07/09/2004, e quelli riportati nella tabella allegata alla Deliberazione della Giunta Regionale (Regione Molise) n. 1171 del 2 agosto 2006. Si noti che questi ultimi valori non derivano da uno studio di pericolosità sismica bensì vanno considerati quali valori di ancoraggio dello spettro di risposta elastico.

**Tabella 1** Valori di  $a_g$  (g) su roccia per un periodo di ritorno di 475 anni (colonna 2) e confronto con i valori di ancoraggio previsti dalla Deliberazione della Giunta Regionale (Regione Molise) n. 1171 del 2 agosto 2006 .

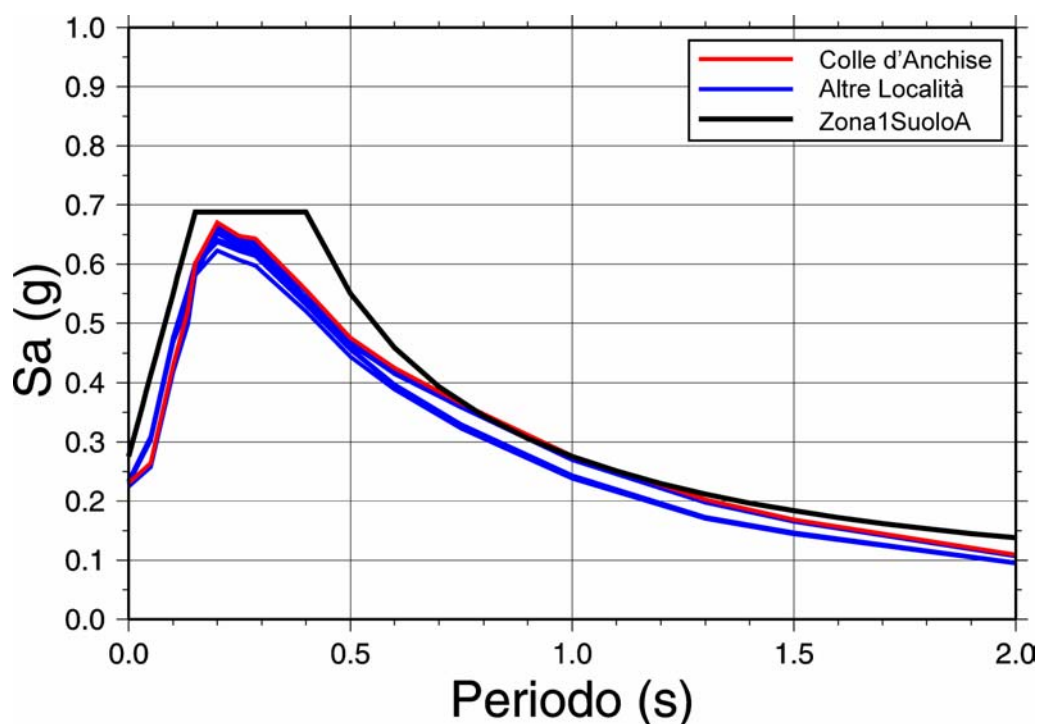
Comune	$a_g$ (g) con prob. di sup. 10% in 50 anni (MPS04)	$a_g$ (g) ancoraggio dello spettro di risposta (DGR n. 1171)
BARANELLO	0.250	0.275
BOJANO	0.267	0.275
CAMPOCHIARO	0.268	0.275
COLLE D'ANCHISE	0.262	0.275
GUARDIAREGIA	0.267	0.275
SAN GIULIANO DEL SANNIO	0.245	0.275
SAN MASSIMO	0.268	0.275
SAN POLO MATESE	0.266	0.275
SEPINO	0.260	0.275
SPINETE	0.260	0.275
VINCHIATURO	0.253	0.275

In figura 4 sono illustrati gli spettri iso-probabili relativi ai Comuni d'interesse. Questi sono confrontati con lo spettro di risposta elastico previsto dalla normativa sismica (OPCM n°3274 e successive modifiche ed integrazioni) per un suolo di categoria 'A' in Zona 1 ( $a_g > 0.25g$ ). Quest'ultimo è ancorato al valore di  $a_g = 0.275g$  così come previsto dalle Deliberazione della Giunta Regionale n. 1171 di cui sopra per i siti in Zona 1. In rosso è indicato lo spettro di risposta calcolato per il Comune di Colle d'Anchise, che verrà considerato quale spettro di riferimento per la disaggregazione della pericolosità sismica.

Dal confronto tra gli spettri di risposta ottenuti appare evidente che lo spettro calcolato per Colle d'Anchise è caratterizzato da valori delle ordinate spettrali tra i più elevati rispetto agli altri centri abitati. Le forme spettrali, inoltre, risultano molto simili, fatto non inatteso in considerazione della limitata estensione del territorio dove è stato condotto lo studio. Pertanto, data la vicinanza tra i Comuni e la somiglianza delle forme spettrali, ai fini della disaggregazione, è stato adottato per i Comuni di studio un unico spettro di risposta probabilistico scalato al valore locale di  $a_g$ . Lo spettro

di risposta a pericolosità uniforme calcolato per il Comune di Colle d'Anchise è stato scelto quale spettro di riferimento.

Dal confronto tra gli spettri probabilistici e quello previsto dalla normativa emerge che le ordinate spettrali di quest'ultimo ben si adattano a quelle ottenute dall'analisi di pericolosità sismica ancorando ciascuno degli spettri al valore locale di  $a_g$ .



**Figura 4** Spettri di risposta probabilistici a pericolosità uniforme (componente orizzontale) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni per tutti i Comuni dell'area di studio. Gli spettri sono confrontati con quello previsto dalla normativa sismica italiana per siti su roccia classificati in Zona 1 (accelerazione di ancoraggio  $a_g = 0.275g$ ).

### 1.6.2 COMUNI IN ZONA 2A

In tabella 2 sono riportati i valori di  $a_g$  calcolati per tutti i Comuni afferenti alla Zona 2A dal Gruppo di Lavoro MPS (2004) e quelli riportati nella tabella allegata alla Deliberazione della Giunta Regionale (Regione Molise) n. 1171 del 2 agosto 2006.

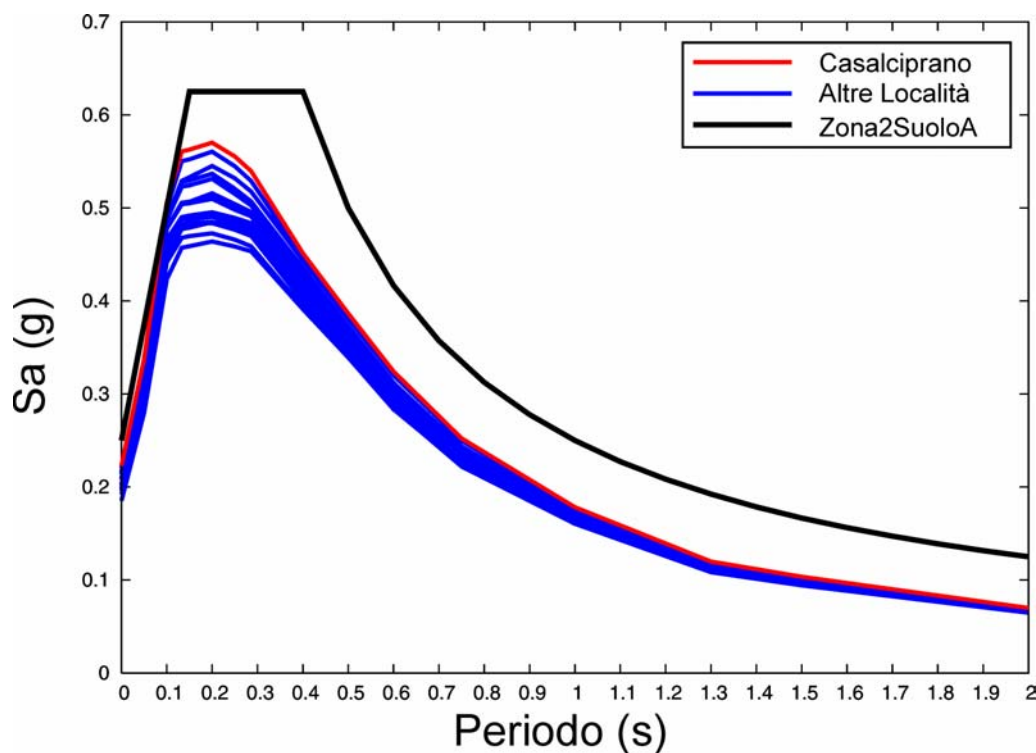
In figura 5 sono illustrati gli spettri relativi ai Comuni d'interesse. Questi sono confrontati con lo spettro di risposta elastico fornito dalla normativa sismica (OPCM n°3274 e successive modifiche ed integrazioni) per un suolo di categoria 'A' e siti classificati in Zona 2 ( $0.15g < a_g \leq 0.25g$ ). Quest'ultimo è ancorato al valore di  $a_g = 0.25g$  così come previsto dalla normativa sismica nazionale e dalla Deliberazione della Giunta Regionale n. 1171 di cui sopra per la maggior parte dei



siti in Zona 2. In rosso è indicato lo spettro di risposta calcolato per il Comune di Casalciprano, considerato quale spettro di riferimento per la disaggregazione della pericolosità sismica.

**Tabella 2** Valori di  $a_g$  (g) su roccia per un periodo di ritorno di 475 anni (colonna 2) e confronto con i valori di ancoraggio previsti dalla Deliberazione della Giunta Regionale (Regione Molise) n. 1171 del 2 agosto 2006 .

Comune	$a_g$ (g) con prob. di sup. 10% in 50 anni (MPS04)	$a_g$ (g) ancoraggio dello spettro di risposta (DGR n. 1171)
BUSO	0.247	0.250
CAMPOBASSO	0.232	0.250
CAMPODIPIETRA	0.215	0.225
CASALCIPRANO	0.245	0.250
CASTROPIGNANO	0.233	0.250
CERCEMAGGIORE	0.228	0.250
CERCEPICCOLA	0.239	0.250
DURONIA	0.232	0.250
FERRAZZANO	0.227	0.250
FOSSALTO	0.226	0.250
GILDONE	0.214	0.225
MIRABELLO SANNITICO	0.229	0.250
MOLISE	0.241	0.250
ORATINO	0.238	0.250
PIETRACUPA	0.225	0.250
RIPAMOLISANI	0.226	0.250
TORELLA DEL SANNIO	0.234	0.250



**Figura 5** Spettri di risposta probabilistici a pericolosità uniforme (componente orizzontale) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni per tutti i Comuni dell'area di studio. Gli spettri sono confrontati con quello previsto dalla normativa sismica italiana per siti su roccia classificati in Zona 2 (accelerazione di ancoraggio  $a_g = 0.25g$ ).

### 1.6.3 COMUNI IN ZONA 2B EST

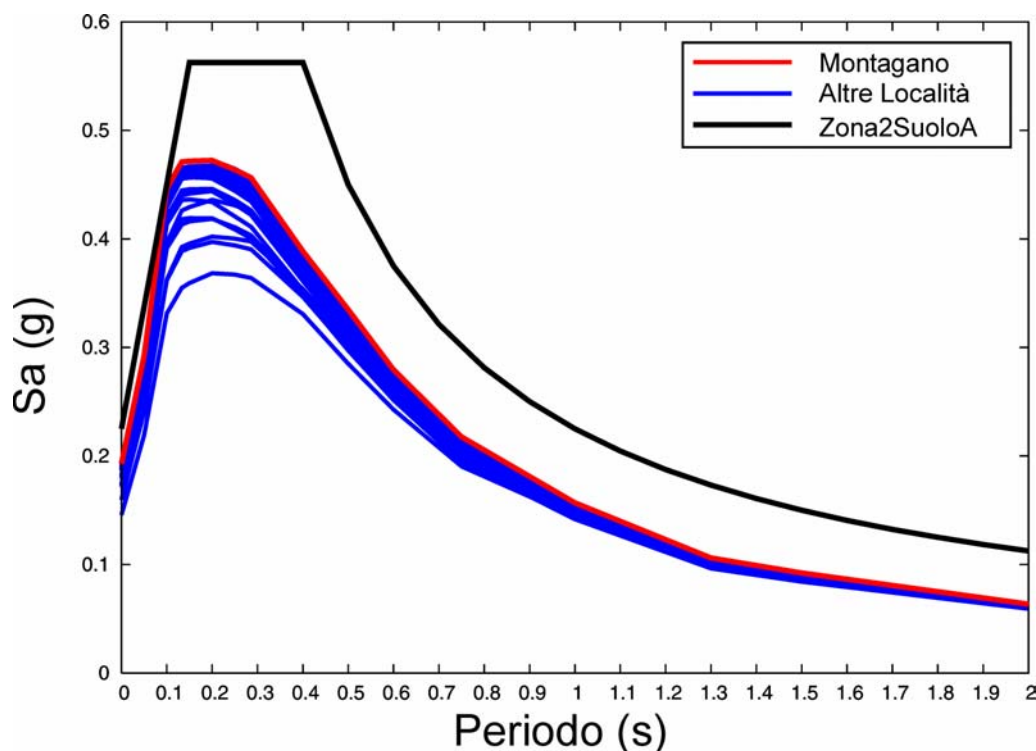
In tabella 3 sono riportati i valori di  $a_g$  calcolati dal Gruppo di Lavoro MPS (2004) per tutti i Comuni afferenti alla Zona 2B Est e quelli riportati nella tabella allegata alla Deliberazione della Giunta Regionale (Regione Molise) n. 1171 del 2 agosto 2006.

In figura 6 sono illustrati gli spettri relativi ai Comuni d'interesse, confrontati con lo spettro di risposta elastico fornito dalla normativa sismica (OPCM n°3274 e successive modifiche ed integrazioni) per un suolo di categoria 'A' e siti classificati in Zona 2. Quest'ultimo è ancorato al valore di  $a_g = 0.225g$  così come previsto dalla Deliberazione della Giunta Regionale n. 1171 di cui sopra per la maggior parte dei siti in Zona 2B Est tra cui il Comune di Montagano il cui spettro di risposta a pericolosità uniforme è stato considerato quale spettro di riferimento per la disaggregazione della pericolosità sismica.

**Tabella 3** Valori di  $a_g$  (g) su roccia per un periodo di ritorno di 475 anni (colonna 2) e confronto con i valori di ancoraggio previsti dalla Deliberazione della Giunta Regionale (Regione Molise) n. 1171 del 2 agosto 2006 .

Comune	$a_g$ (g) con prob. di sup. 10% in 50 anni (MPS04)	$a_g$ (g) ancoraggio dello spettro di risposta (DGR n. 1171)
CAMPOLIETO	0.216	0.225
CASTELBOTTACCIO	0.205	0.225
CIVITACAMPOMARANO	0.194	0.200
GAMBATESA	0.182	0.200
JELSI	0.204	0.225
LIMOSANO	0.219	0.225
LUCITO	0.209	0.225
LUPARA	0.198	0.200
MACCHIAVALFORTORE	0.202	0.225
MATRICE	0.220	0.225
MONACILIONI	0.212	0.225
MONTAGANO	0.222	0.225
PETRELLA TIFERNINA	0.215	0.225
PIETRACATELLA	0.203	0.225
RICCIA	0.192	0.200
SALCITO	0.210	0.225
SAN BIASE	0.212	0.225
SAN GIOVANNI IN GALDO	0.215	0.225
SANT'ANGELO LIMOSANO	0.216	0.225
SANT'ELIA PIANISI	0.209	0.225
TORO	0.214	0.225
TRIVENTO	0.188	0.200
TUFARA	0.172	0.175





**Figura 6** Spettri di risposta probabilistici a pericolosità uniforme (componente orizzontale) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni per tutti i Comuni dell'area di studio. Gli spettri sono confrontati con quello previsto dalla normativa sismica italiana per siti su roccia classificati in Zona 2 (accelerazione di ancoraggio  $a_g = 0.225g$ ).

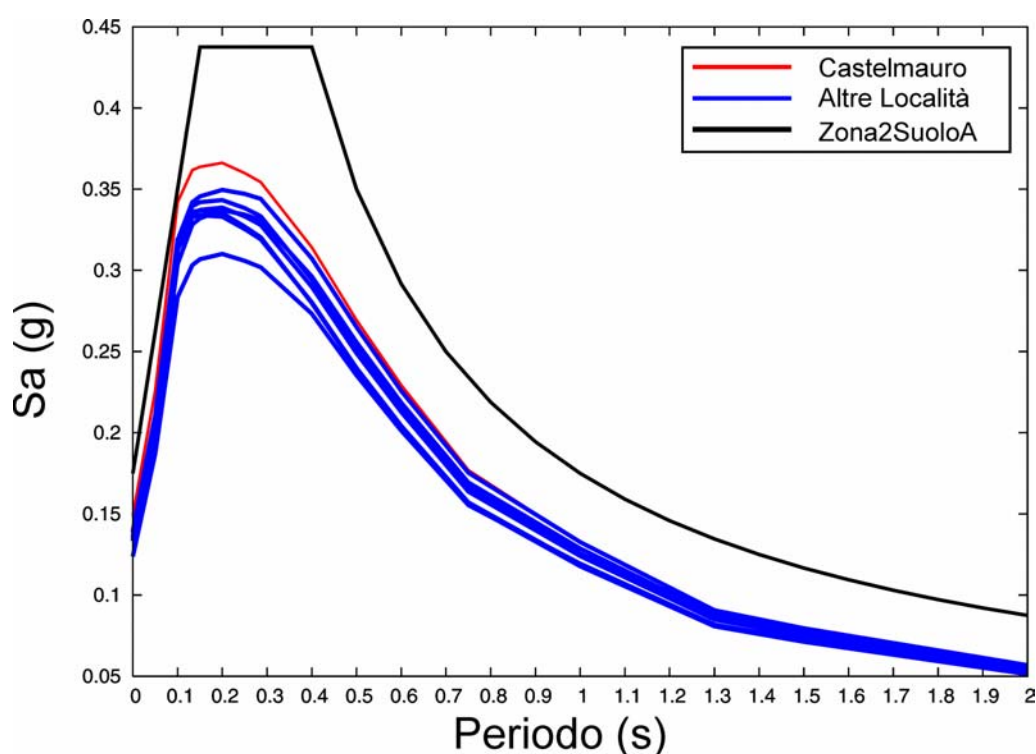
#### 1.6.4 COMUNI IN ZONA 2B NORD

In tabella 4 sono riportati i valori di  $a_g$  calcolati dal Gruppo di Lavoro MPS (2004) per tutti i Comuni afferenti alla Zona 2B – settore settentrionale e quelli riportati nella tabella allegata alla Deliberazione della Giunta Regionale (Regione Molise) n. 1171 del 2 agosto 2006. Si ricorda che questi ultimi valori vanno considerati quali valori di ancoraggio dello spettro di risposta elastico.

In figura 7 sono illustrati gli spettri relativi ai Comuni d'interesse. Questi sono confrontati con lo spettro di risposta elastico fornito dalla normativa sismica (OPCM n°3274 e successive modifiche ed integrazioni) per un suolo di categoria 'A' e siti classificati in Zona 2. Quest'ultimo è ancorato al valore di  $a_g = 0.175g$  così come previsto dalla Deliberazione della Giunta Regionale n. 1171 di cui sopra per tutti i Comuni in questa Zona eccezion fatta per quello di Castelmauro il cui spettro di risposta a pericolosità uniforme è stato considerato quale spettro di riferimento per la disaggregazione della pericolosità sismica. Come si può notare la Zona comprende Comuni che sono limitrofi a quelli in Zona 3 per cui lo spettro di normativa appare piuttosto conservativo rispetto a quello isoprobabile.

**Tabella 4** Valori di  $a_g$  (g) su roccia per un periodo di ritorno di 475 anni (colonna 2) e confronto con i valori di ancoraggio previsti dalla Deliberazione della Giunta Regionale (Regione Molise) n. 1171 del 2 agosto 2006 .

Comune	$a_g$ (g) con prob. di sup. 10% in 50 anni (MPS04)	$a_g$ (g) ancoraggio dello spettro di risposta (DGR n. 1171)
ACQUAVIVA COLLECROCE	0.151	0.175
CAMPOMARINO	0.127	0.175
CASTELMAURO	0.170	0.200
MONTECILFONE	0.145	0.175
MONTEFALCONE DEL SANNIO	0.151	0.175
PALATA	0.150	0.175
PORTOCANNONE	0.153	0.175
ROCCAIVIVARA	0.163	0.175



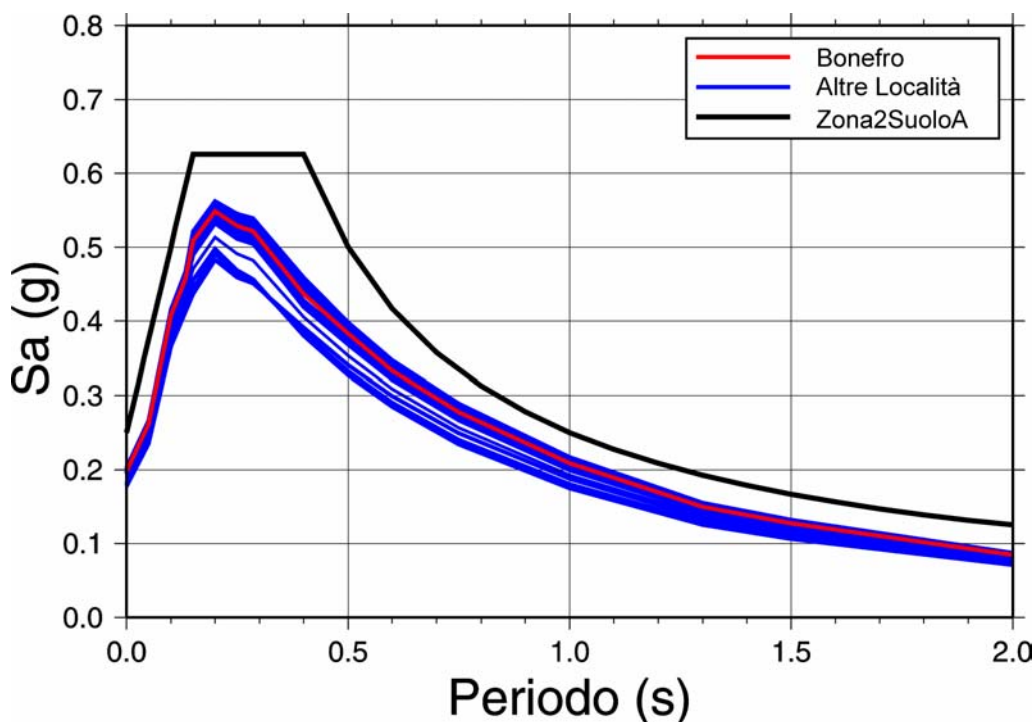
**Figura 7** Spettri di risposta probabilistici a pericolosità uniforme (componente orizzontale) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni per tutti i Comuni dell'area di studio. Gli spettri sono confrontati con quello previsto dalla normativa sismica italiana per siti su roccia classificati in Zona 2 (accelerazione di ancoraggio  $a_g = 0.175g$ ).

### 1.6.5 COMUNI DEL CRATERE

In tabella 5 sono riportati i valori di  $a_g$  calcolati dal Gruppo di Lavoro MPS (2004) per tutti i Comuni afferenti all'area del "cratere" e quelli di Guardialfiera e San Martino in Pensilis, così come derivati dalla tabella allegata al decreto del P.G.R. – commissario delegato – n. 74 del 07/09/2004. Tali valori sono confrontati con quelli di ancoraggio riportati nella tabella allegata alla Deliberazione della Giunta Regionale (Regione Molise) n. 1171 del 2 agosto 2006.

**Tabella 5** Valori di  $a_g$  (g) su roccia per un periodo di ritorno di 475 anni (colonna 2) e confronto con i valori di ancoraggio previsti dalla Deliberazione della Giunta Regionale (Regione Molise) n. 1171 del 2 agosto 2006 .

Comune	$a_g$ (g) con prob. di sup. 10% in 50 anni (MPS04)	$a_g$ (g) ancoraggio dello spettro di risposta (DGR n. 1171)
BONEFRO	0.209	0.225
CASACALENDA	0.207	0.225
CASTELLINO DEL BIFERNO	0.210	0.225
COLLETORTO	0.208	0.225
GUARDIALFIERA	0.190	0.200
LARINO	0.191	0.200
MONTELONGO	0.208	0.225
MONTORIO NEI FRENTANI	0.204	0.225
MORRONE DEL SANNIO	0.210	0.225
PROVVIDENTI	0.208	0.225
RIPABOTTONI	0.212	0.225
ROTELLO	0.205	0.225
SAN GIULIANO DI PUGLIA	0.209	0.225
SAN MARTINO IN PENSILIS	0.175	0.200
SANTA CROCE DI MAGLIANO	0.208	0.225
URURI	0.194	0.200



**Figura 8** Spettri di risposta probabilistici a pericolosità uniforme (componente orizzontale) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni per tutti i Comuni dell'area di studio. Gli spettri sono confrontati con quello previsto dalla normativa sismica italiana per siti su roccia classificati in Zona 2 (accelerazione di ancoraggio  $a_g = 0.25g$ ).

In figura 8 sono illustrati gli spettri relativi ai Comuni d'interesse, inclusi quelli di Guardialfiera e San Martino in Pensilis. Per questi due ultimi Comuni, i valori delle ordinate spettrali per un

periodo di ritorno di 475 anni risultano troppo elevati rispetto a quelli ottenuti per i Comuni in Zona 2B Nord mentre ben si accordano con quelli calcolati per i Comuni limitrofi afferenti al “cratere”. Come sopra, gli spettri di risposta a pericolosità uniforme sono confrontati con lo spettro di risposta elastico fornito dalla normativa sismica (OPCM n°3274 e successive modifiche ed integrazioni) per un suolo di categoria ‘A’ e siti classificati in Zona 2. Quest’ultimo è ancorato al valore di  $a_g = 0.25g$ . In rosso è indicato lo spettro di risposta calcolato per il Comune di Bonefro, considerato quale spettro di riferimento per la disaggregazione della pericolosità sismica. Dal confronto tra gli spettri di risposta, infatti, appare evidente che lo spettro calcolato per Bonefro è caratterizzato da ordinate spettrali tra le più elevate rispetto agli altri centri abitati. Solo alcuni Comuni sono caratterizzati da valori delle ordinate spettrali maggiori.

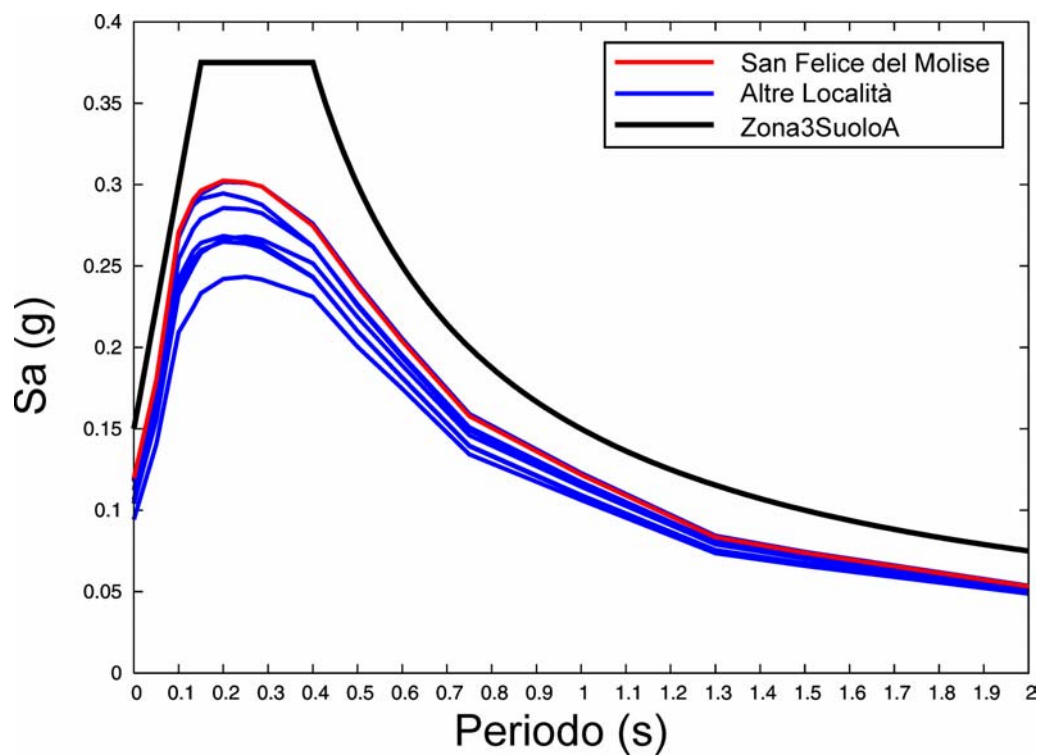
### 1.6.6 COMUNI IN ZONA 3

In tabella 6 sono riportati i valori di  $a_g$  calcolati per tutti i Comuni afferenti alla Zona 3. Nuovamente tali valori sono confrontati con quelli riportati nella tabella allegata alla Deliberazione della Giunta Regionale (Regione Molise) n. 1171 del 2 agosto 2006.

**Tabella 6** Valori di  $a_g$  (g) su roccia per un periodo di ritorno di 475 anni (colonna 2) e confronto con i valori di ancoraggio previsti dalla Deliberazione della Giunta Regionale (Regione Molise) n. 1171 del 2 agosto 2006 .

Comune	$a_g$ (g) con prob. di sup. 10% in 50 anni (MPS04)	$a_g$ (g) ancoraggio dello spettro di risposta (DGR n. 1171)
GUGLIONESI	0.139	0.150
MAFALDA	0.124	0.125
MONTEMITRO DI BISACCIA	0.140	0.150
PETACCIATO	0.109	0.125
SAN FELICE DEL MOLISE	0.144	0.150
SAN GIACOMO DEGLI SCHIAVONI	0.122	0.150
TAVENNA	0.138	0.150
TERMOLI	0.114	0.150

In figura 9 sono illustrati gli spettri relativi ai Comuni d’interesse confrontati con lo spettro di risposta elastico fornito dalla normativa sismica (OPCM n°3274 e successive modifiche ed integrazioni) per un suolo di categoria ‘A’ e siti classificati in Zona 3 ( $0.05g < a_g \leq 0.15g$ ). Quest’ultimo è ancorato al valore di  $a_g = 0.15g$  così come previsto dalla normativa sismica nazionale e dalla Deliberazione della Giunta Regionale n. 1171 di cui sopra per la maggior parte dei siti in Zona 3. In rosso è indicato lo spettro di risposta calcolato per il Comune di San Felice del Molise, considerato quale spettro di riferimento per la disaggregazione della pericolosità sismica.



**Figura 9** Spettri di risposta probabilistici a pericolosità uniforme (componente orizzontale) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni per tutti i Comuni dell'area di studio. Gli spettri sono confrontati con quello previsto dalla normativa sismica italiana per siti su roccia classificati in Zona 3 (accelerazione di ancoraggio  $a_g = 0.15g$ ).

## 2 DEFINIZIONE DELL'INPUT SISMICO

La determinazione della risposta sismica dei Comuni di Campobasso ha richiesto la definizione dell'input sismico. L'input sismico, ai fini di un'analisi di risposta sismica locale, può essere definito secondo l'approccio probabilistico o deterministico. Il primo si basa sulla selezione di accelerogrammi naturali in funzione dei parametri magnitudo e distanza sorgente-sito più probabili ovvero che contribuiscono maggiormente alla pericolosità del sito d'interesse. Il secondo, invece, consiste nella scelta di accelerogrammi in funzione delle conoscenze riguardanti la sismicità storica dell'area in esame o nella generazione di accelerogrammi sintetici (mediante simulazione fisica della sorgente e della propagazione) o artificiali. In molti casi i due metodi possono essere considerati complementari.

L'approccio adottato nell'ambito del presente studio è stato quello probabilistico che garantisce sufficiente efficienza ed affidabilità con tempi di esecuzione più rapidi, non richiedendo complesse elaborazioni e la conoscenza di severi vincoli geologici e sismologici (distribuzione delle faglie attive dell'area, conoscenza delle loro dimensioni, mobilità e potenzialità sismogenetica).

Il metodo adottato per la definizione dell'input sismico ha richiesto i seguenti passi:

- 1) analisi della pericolosità per i siti considerati e determinazione degli spettri isoprobabili (ved. Capitolo 1);
- 2) disaggregazione della pericolosità per la definizione dei terremoti di scenario ovvero della coppia Magnitudo - Distanza ( $M-D$ ) che contribuisce maggiormente alla pericolosità del sito;
- 3) selezione di accelerogrammi naturali in funzione dei valori di  $M-D$  e della sismotettonica dell'area con il vincolo che lo spettro medio deterministico soddisfi i requisiti della spettro-compatibilità con quello probabilistico;

### 2.1 CONSIDERAZIONI SULLA SCELTA DEGLI ACCELEROGRAMMI

La definizione dell'input sismico per la caratterizzazione della risposta sismica al suolo richiede l'impiego di accelerogrammi registrati o generati mediante simulazione fisica della sorgente e della propagazione. L'impiego di accelerogrammi naturali è preferibile rispetto a *time-histories* artificiali o sintetiche dal momento che possiedono un più realistico contenuto in frequenza, una corretta correlazione temporale tra le componenti orizzontale e verticale dello scuotimento, ed un realistico contenuto energetico in relazione ai parametri sismogenetici (EC8-1 Parte 1). In condizioni ideali, ma raramente verificabili in natura, è auspicabile l'impiego di dati accelerometrici registrati nell'area di studio.

Registrazioni strong-motion sono rese disponibili da banche dati on-line che riportano per le diverse registrazioni il valore di alcuni parametri di scuotimento, i parametri sismologici (magnitudo, distanza, meccanismo di sorgente) e quelli geologico-geotecnici atti a caratterizzare i siti di pertinenza delle stazioni sismometriche. La scelta degli accelerogrammi naturali impone quindi una selezione, sulla base di questi parametri, per garantire una adeguata rappresentatività dell'input sismico.

Una volta definiti i parametri sismologici che maggiormente influenzano la pericolosità al sito di interesse e selezionato un numero sufficiente di accelerogrammi (in base alla normativa sismica - OPCM n°3274/2003 e successive modifiche ed integrazioni - il numero di accelerogrammi o gruppi di accelerogrammi deve essere almeno pari a 3) quale input sismico, questo, deve, per quanto possibile, soddisfare il requisito della spettro-compatibilità. La normativa italiana (OPCM n°3274/2003 e successive modifiche ed integrazioni) impone che l'ordinata spettrale risultante dalla media degli spettri di risposta degli accelerogrammi selezionati, non presenti uno scarto in difetto maggiore del 10% rispetto alla corrispondente ordinata dello spettro di risposta di riferimento nel campo di periodi che va da 0.15s a 2s e da 0.15s a  $2T$  con  $T$  periodo proprio fondamentale della struttura in campo elastico.

## 2.2 DISAGGREGAZIONE DELLA PERICOLOSITA' SISMICA

La disaggregazione è un'operazione che consente di separare i diversi contributi alla pericolosità sismica individuando quindi quale sorgente sismica contribuisce maggiormente alla pericolosità del sito di riferimento. Espresso in altri termini la disaggregazione permette di ricavare la magnitudo e la distanza sorgente-sito più probabili ovvero di individuare sorgenti sismogenetiche a distanza  $R$  capaci di generare terremoti di magnitudo  $M$ . A tal scopo è necessario esprimere il tasso di eccedenza di un dato scuotimento in funzione di magnitudo e distanza come di seguito (Kramer, 1996):

$$\lambda_{y^*} \cong P[M = m_j]P[R = r_k] \sum_{i=1}^{N_s} \nu_i P[Y > y^* | m_j, r_k]$$

dove  $\lambda_{y^*}$  è il tasso medio di eccedenza di uno scuotimento  $y^*$ ,  $P[M = m_j]$  è la probabilità che si verifichi un terremoto di magnitudo  $m_j$ ,  $P[R = r_k]$  è la probabilità che si verifichi un terremoto a distanza  $r_k$ ,  $N_s$  è il numero di sorgenti sismiche,  $\nu_i$  è il tasso di occorrenza medio corrispondente ad una data soglia di magnitudo,  $P[Y > y^* | m_j, r_k]$  è la probabilità che il valore  $y^*$  di un parametro di scuotimento  $Y$  sia superato dallo scuotimento indotto da un terremoto di magnitudo  $m_j$  ad una distanza  $r_k$ .



**Tabella 7** Coppie  $M$ - $R$  ottenute dalla disaggregazione dei valori di  $a_g$  e  $Sa(1\text{Hz})$  corrispondenti al periodo di ritorno di 475 anni calcolati per i Comuni di riferimento.

Comuni	$M_{\text{PGA}}$	$R_{\text{PGA}}$ (km)	$M_{Sa(1.0\text{Hz})}$	$R_{Sa(1.0\text{Hz})}$ (km)
Colle d'Anchise	5.61	15.7	6.63	28.5
Casalciprano	5.68	16.8	6.67	31.0
Montagano	5.41	20.9	6.67	40.3
Castelmauro	5.36	24.3	6.72	53.5
Bonefro	5.53	15.4	6.46	34.3
San Felice del Molise	5.78	34.1	6.83	62.4

La disaggregazione è stata effettuata con riferimento allo spettro di risposta probabilistico a pericolosità uniforme calcolato per i Comuni di riferimento definiti per ciascuna Zona sismica. La disaggregazione è stata condotta sia per il valore di  $a_g$  corrispondente al periodo di ritorno di 475 anni che per il valore di accelerazione spettrale alla frequenza di 1Hz,  $Sa(1\text{Hz})$ , in modo da riprodurre la porzione a lungo periodo dello spettro probabilistico. Pertanto, al fine di selezionare gli accelerogrammi più opportuni sarà necessario prendere in considerazione entrambe le coppie magnitudo-distanza ottenute dalla disaggregazione della pericolosità sismica, in modo tale che l'input sismico fornisca uno spettro medio rappresentativo per l'area di studio compatibile con quanto indicato dalla normativa sismica italiana.

### 2.3 SELEZIONE DEGLI ACCELEROGRAMMI E CARATTERIZZAZIONE DELL'INPUT SISMICO SU ROCCIA

Gli accelerogrammi naturali per la caratterizzazione dell'input sismico per l'area di studio sono stati selezionati dalla banca dati "European Strong Motion Database (ESD)". Gli accelerogrammi, tutti registrati su roccia, sono stati selezionati con opportune tolleranze sui valori dei parametri ottenuti dalla disaggregazione della pericolosità sismica in modo da rispettare la condizione di spettro-compatibilità con lo spettro probabilistico medio di riferimento. Tuttavia il primo criterio impiegato nella selezione degli accelerogrammi è stato quello relativo alle caratteristiche del sito presso cui è installata la stazione accelerometrica: sono stati selezionati solo accelerogrammi registrati da stazioni poste su roccia, quindi non influenzati da fenomeni di amplificazione sismica locale. Di questi sono stati considerati gli accelerogrammi caratterizzati da meccanismi di sorgente congruenti con quelli dell'area in esame (prevalentemente distensivi e trascorrenti).

Applicando i criteri di selezione appena descritti, è stato definito un database di accelerogrammi (componenti orizzontali) per ciascuno dei sei gruppi di Comuni da cui sono stati selezionati i



segnali (input sismico) che meglio riproducono lo spettro isoprobabile di riferimento in ottemperanza al vincolo di spettro-compatibilità imposto dalla normativa sismica (OPCM n°3274/2003 e successive modifiche ed integrazioni). Dato il numero elevato di combinazioni possibili, la selezione degli accelerogrammi è stata effettuata mediante un procedimento automatico basato su un approccio di tipo Monte Carlo. Tale procedura si basa sulla generazione casuale di un numero elevato (5000 nel caso in esame) di gruppi di  $n$  (5, 6 o 7 nello studio in questione) accelerogrammi; per ogni gruppo è stato calcolato lo spettro di risposta medio e valutato l'adattamento rispetto allo spettro di risposta probabilistico di riferimento.

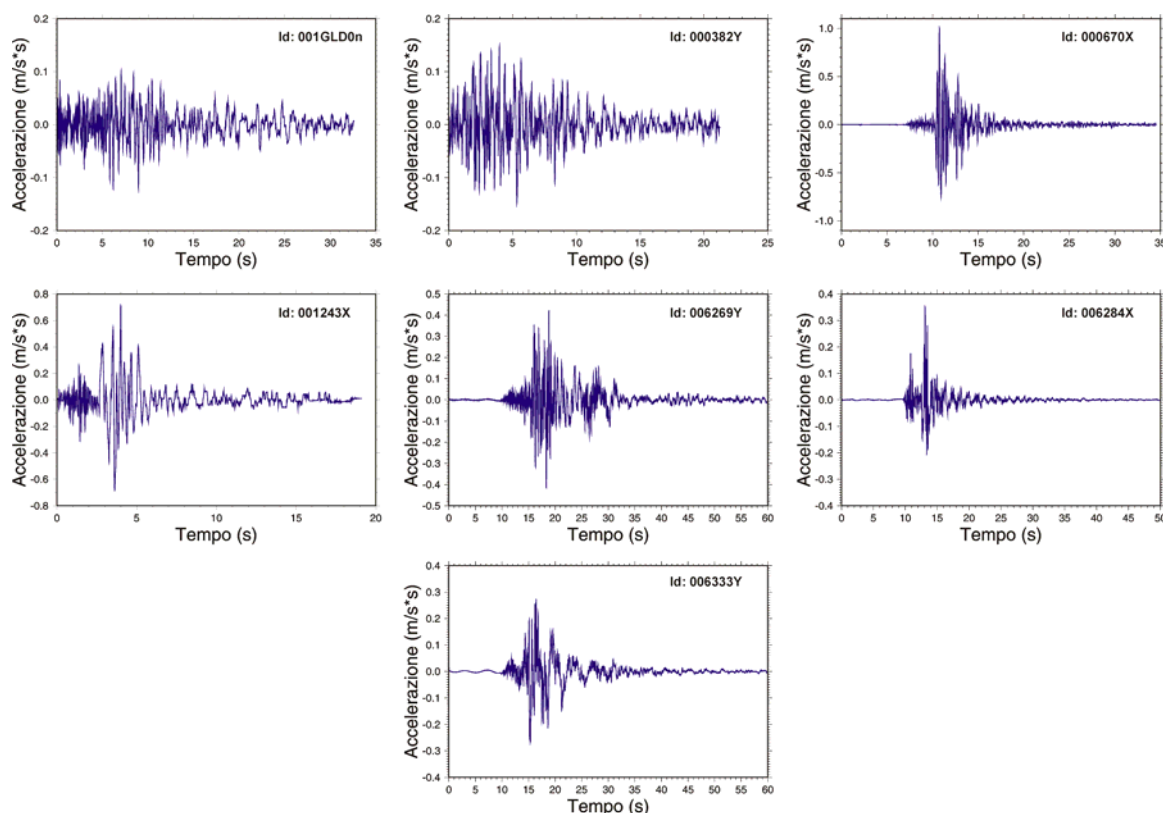
Va notato che gli accelerogrammi, prima di essere utilizzati, devono essere scalati al valore di  $a_g$  di ancoraggio del Comune d'interesse indicato nelle tabelle 1-6 e nella tabella allegata alla Deliberazione della Giunta Regionale (Regione Molise) n. 1171 del 2 agosto 2006.

### 2.3.1 COMUNI IN ZONA 1

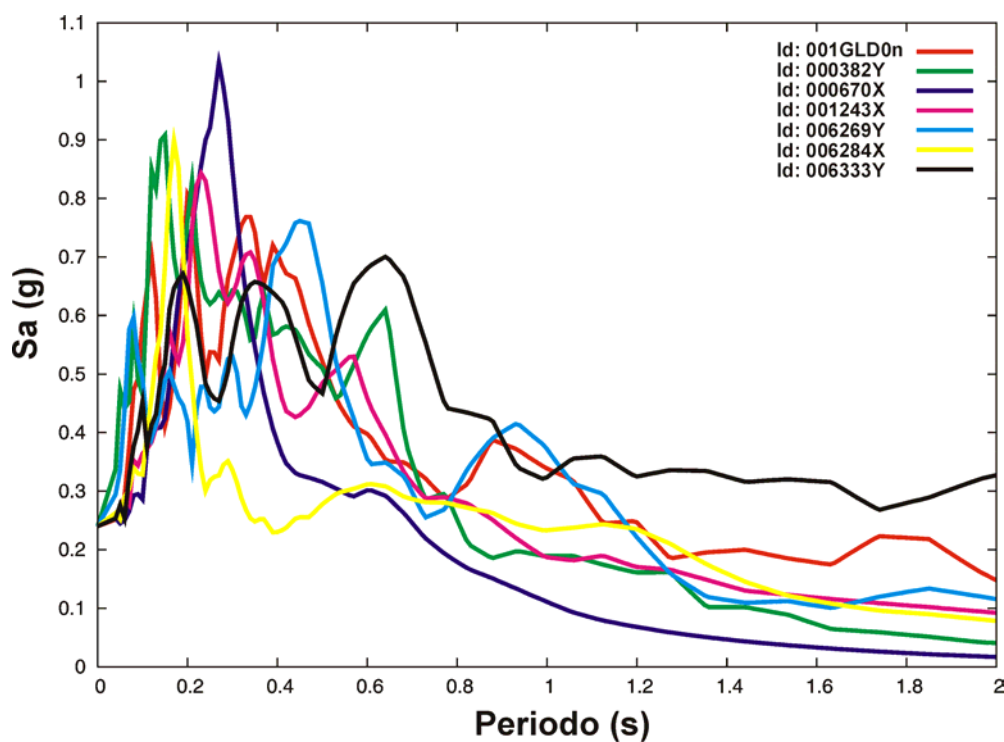
In tabella 8 sono riassunti i parametri sismologici più importanti degli accelerogrammi selezionati quale input sismico per le analisi numeriche di risposta sismica dei siti afferenti ai Comuni in Zona 1. Le *time histories* di tali accelerogrammi sono mostrate in figura 10. Tra gli accelerogrammi selezionati sono inclusi due eventi relativamente forti ( $M_s = 6.4-6.5$ ) necessari a riprodurre la porzione di spettro nella banda spettrale 1.0-2.0s. E' inoltre incluso, come prevedibile, il terremoto del Molise datato 01/11/2002 ( $M_l = 5.4$ ) che, in quanto locale, è maggiormente rappresentativo delle caratteristiche di sorgente e propagazione dell'area di studio.

**Tabella 8** Parametri dei terremoti selezionati quale input sismico per le analisi numeriche di risposta sismica dei siti in Zona 1.

ID	Nome	Nazione	Data	Lat. Epicentro	Long. Epicentro	$M_w$	$M_s$	$M_l$	Dist. Epic. (km)
001GLD0n	Molise (aftershock)	Italy	01/11/2002	41.72 N	14.84 E	-	-	5.4	23.7
000382Y	Lazio-Abruzzo (aftershock)	Italy	11/05/1984	41.73 N	13.92 E	5.5	5.3	5.1	16
000670X	Umbria-Marche (aftershock)	Italy	06/10/1997	43.02 N	12.84 E	5.5	5.2	5.4	20
001243X	Izmit (aftershock)	Turkey	13/09/1999	40.76 N	30.08 E	5.8	5.8	6.2	15
006269Y	South Iceland	Iceland	17/06/2000	63.97 N	20.36 W	6.5	6.5	-	34
006284X	South Iceland (aftershock)	Iceland	17/06/200	63.95 N	20.46 W	-	-	5.0	18
006333Y	South Iceland (aftershock)	Iceland	21/06/2000	63.97 N	20.71 W	-	6.4	6.6	28

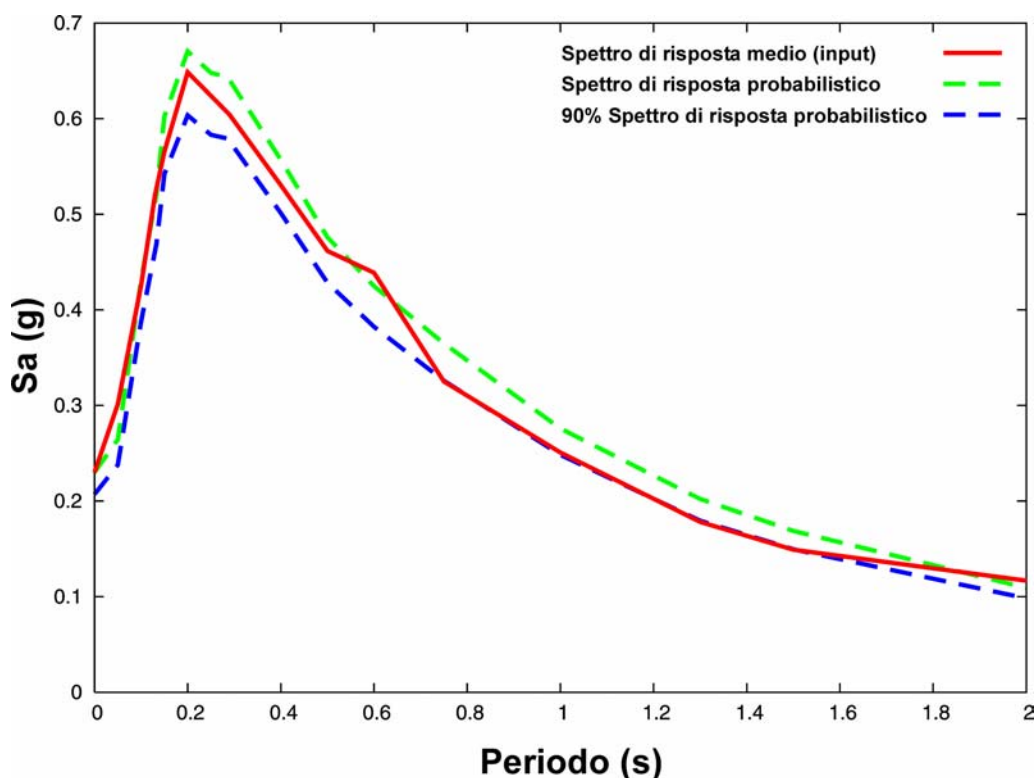


**Figura 10** Input sismico per in Comuni in Zona 1: gruppo di 7 accelerogrammi (componente orizzontale) selezionati allo scopo di riprodurre lo spettro di risposta a pericolosità uniforme di riferimento.



**Figura 11** Spettri di risposta dei 7 accelerogrammi selezionati. La figura mostra i diversi contributi, in termini di ordinate spettrali, da parte dei singoli accelerogrammi.

In figura 11 sono rappresentati gli spettri di risposta dei singoli accelerogrammi selezionati, tutti ancorati allo stesso valore di  $a_g$  (0.240g) e relativi ad uno smorzamento  $\xi$  del 5% mentre in figura 12 è illustrato il confronto tra lo spettro di risposta medio dei 7 accelerogrammi e lo spettro probabilistico per un periodo di ritorno di 475 anni.



**Figura 12** Confronto tra lo spettro di risposta medio dei 7 accelerogrammi (linea rossa), lo spettro di risposta probabilistico (linea verde tratteggiata) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni e il suo 90% (linea verde tratteggiata).

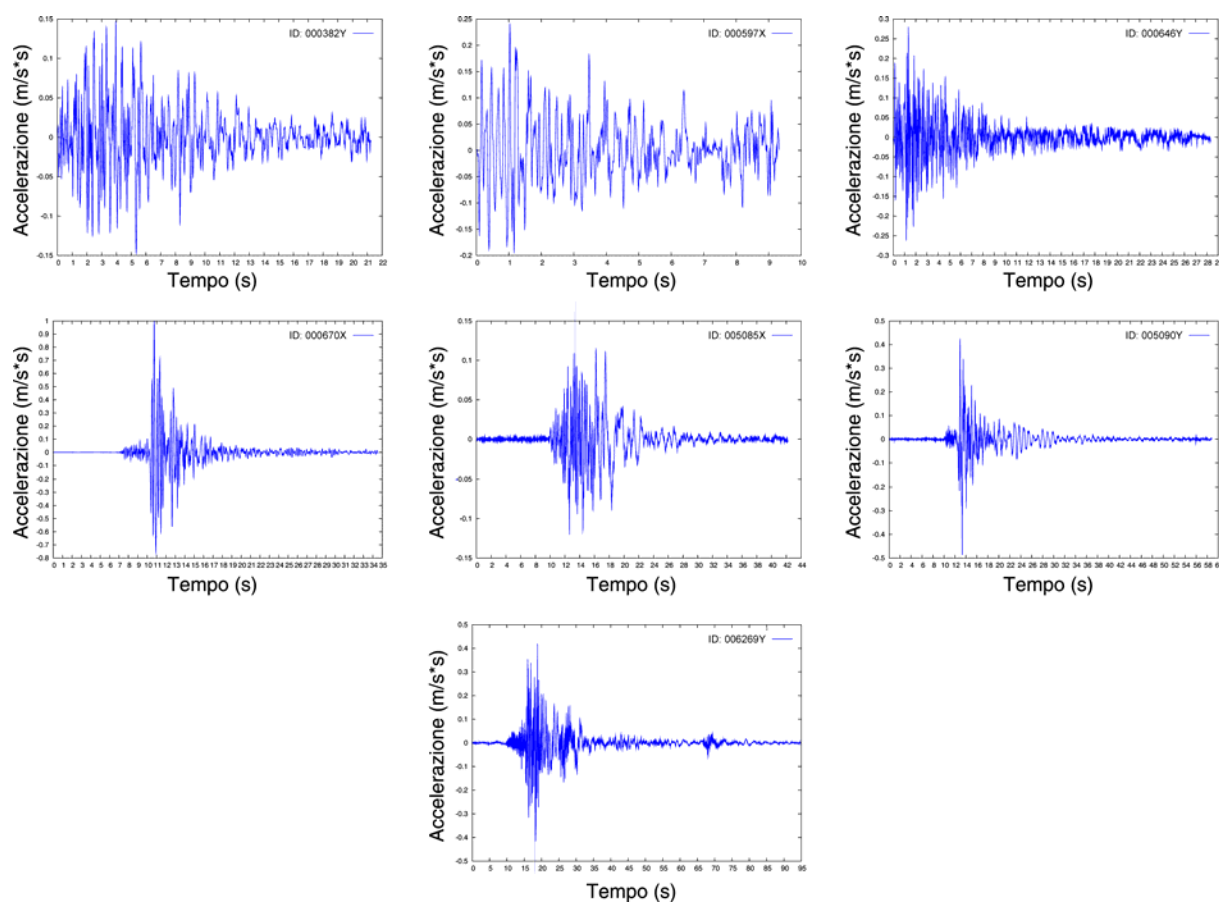
### 2.3.2 COMUNI IN ZONA 2A

In tabella 9 sono riassunti i parametri sismologici più importanti degli accelerogrammi selezionati quale input sismico per le analisi numeriche di risposta sismica dei siti afferenti ai Comuni in Zona 2A. Le *time histories* di tali accelerogrammi sono mostrate in figura 13.

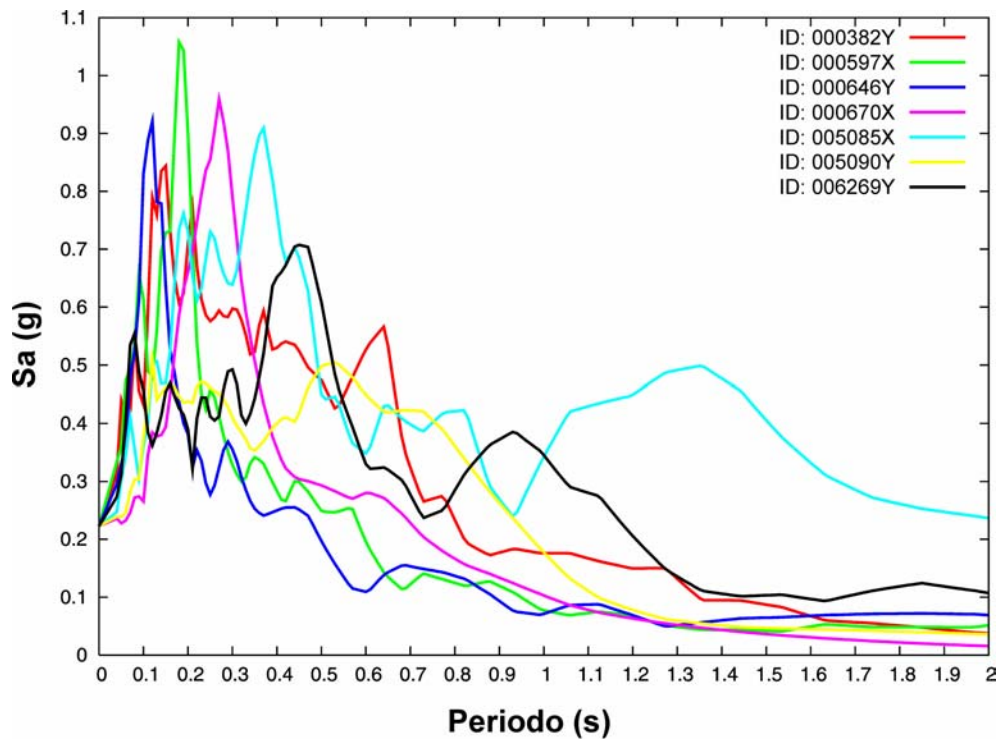
In figura 14 sono rappresentati gli spettri di risposta dei singoli accelerogrammi selezionati, tutti ancorati allo stesso valore di  $a_g$  (0.223g) e relativi ad uno smorzamento  $\xi$  del 5% mentre in figura 15 è illustrato il confronto tra lo spettro di risposta medio dei 7 accelerogrammi e lo spettro probabilistico.

**Tabella 9** Parametri dei terremoti selezionati quale input sismico per le analisi numeriche di risposta sismica dei siti in Zona 2A.

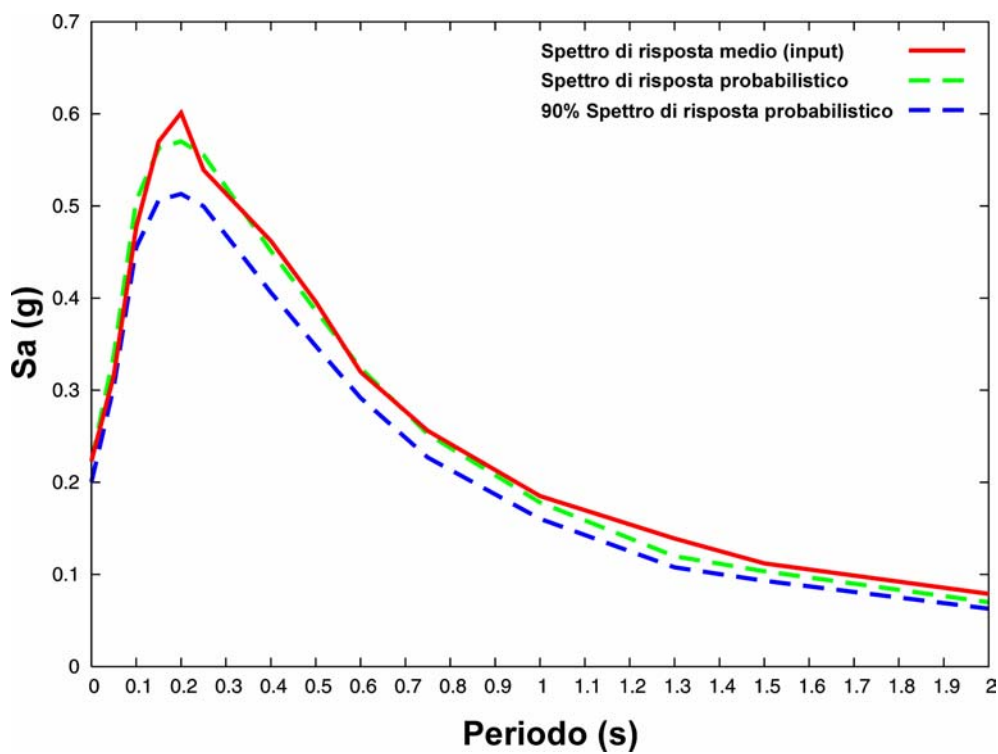
ID	Nome	Nazione	Data	Lat. Epicentro	Long. Epicentro	$M_w$	$M_s$	$M_l$	Dist. Epic. (km)
000382Y	Lazio-Abruzzo (aftershock)	Italy	11/05/1984	41.73 N	13.92 E	5.5	5.3	5.1	16
000597X	Umbria-Marche	Italy	26/09/1997	43.02 N	12.89 E	5.7	5.5	5.6	24
000646Y	Umbria-Marche (aftershock)	Italy	14/10/1997	42.92 N	12.93E	5.6	5.6	5.5	17
000670X	Umbria-Marche (aftershock)	Italy	06/10/1997	43.02 N	12.84 E	5.5	5.2	5.4	20
005085X	Iceland	Iceland	04/06/1998	64.04 N	21.29 W	5.4	5.2	4.7	15
005090Y	Iceland	Iceland	04/06/1998	64.04 N	21.29 W	5.4	5.2	4.7	18
006269Y	South Iceland	Iceland	17/06/2000	63.97 N	20.36 W	6.5	6.5	-	34



**Figura 13** Input sismico per in Comuni in Zona 2A: gruppo di 7 accelerogrammi (componente orizzontale) selezionati allo scopo di riprodurre lo spettro di risposta a pericolosità uniforme di riferimento.



**Figura 14** Spettri di risposta dei 7 accelerogrammi selezionati. La figura mostra i diversi contributi, in termini di ordinate spettrali, da parte dei singoli accelerogrammi.



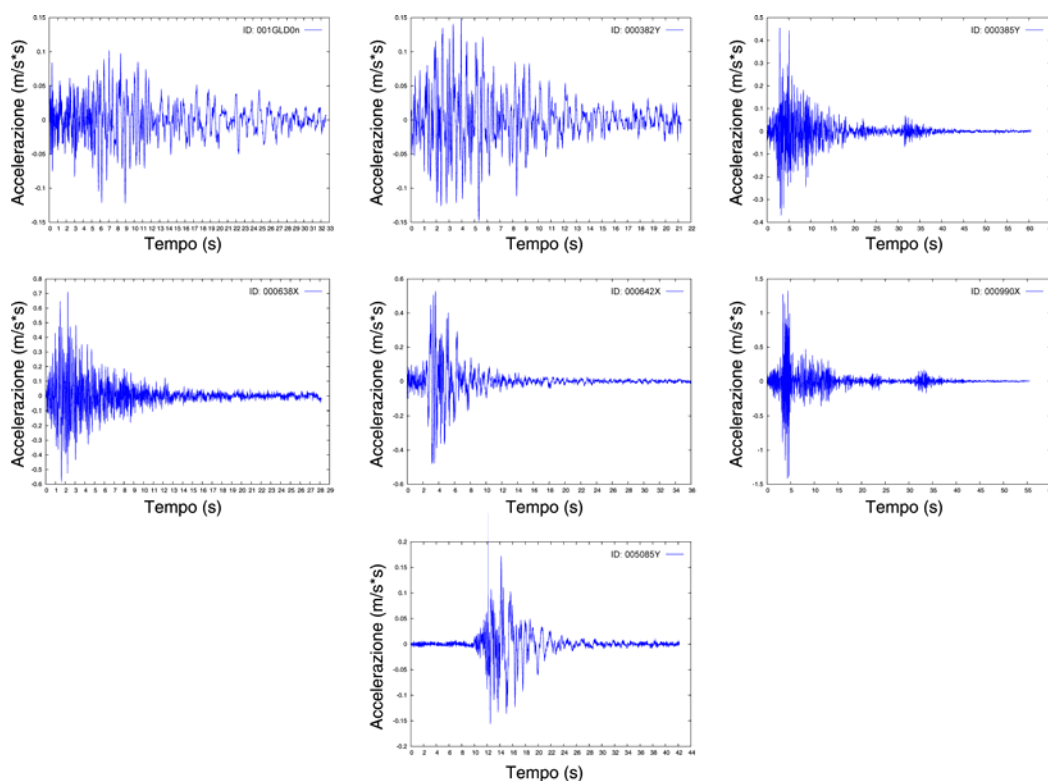
**Figura 15** Confronto tra lo spettro di risposta medio dei 7 accelerogrammi (linea rossa), lo spettro di risposta probabilistico (linea verde tratteggiata) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni e il suo 90% (linea blu tratteggiata).

### 2.3.3 COMUNI IN ZONA 2B EST

In tabella 10 sono riassunti i parametri sismologici degli accelerogrammi selezionati quale input sismico per le analisi numeriche di risposta sismica dei siti afferenti ai Comuni in Zona 2B – settore orientale. Le *time histories* di tali accelerogrammi sono mostrate in figura 16.

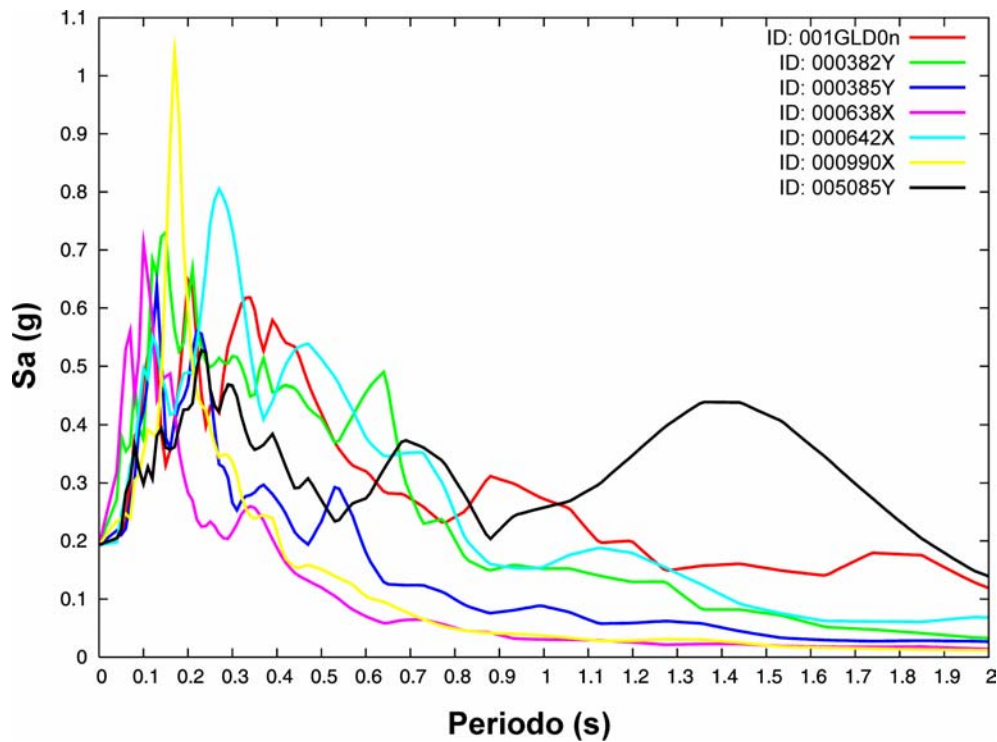
**Tabella 10** Parametri dei terremoti selezionati quale input sismico per le analisi numeriche di risposta sismica dei siti in Zona 2B Est.

ID	Nome	Nazione	Data	Lat. Epicentro	Long. Epicentro	$M_w$	$M_s$	$M_l$	Dist. Epic. (km)
001GLD0n	Molise (aftershock)	Italy	01/11/2002	41.72 N	14.84 E	-	-	5.4	23.7
000382Y	Lazio-Abruzzo (aftershock)	Italy	11/05/1984	41.73 N	13.92 E	5.5	5.3	5.1	16
000385Y	Lazio-Abruzzo (aftershock)	Italy	11/05/1984	41.73 N	13.92 E	5.5	5.3	5.1	15
000638X	Umbria-Marche (aftershock)	Italy	14/10/1997	42.92 N	12.93 E	5.6	5.6	5.5	17
000642X	Umbria-Marche (aftershock)	Italy	14/10/1997	42.92 N	12.93 E	5.6	5.6	5.5	23
000990X	Lazio-Abruzzo (aftershock)	Italy	11/05/1984	41.73 N	13.92 E	5.5	5.3	5.1	15
005085Y	Iceland	Iceland	04/06/1998	64.04 N	21.29 W	5.4	5.2	4.7	15

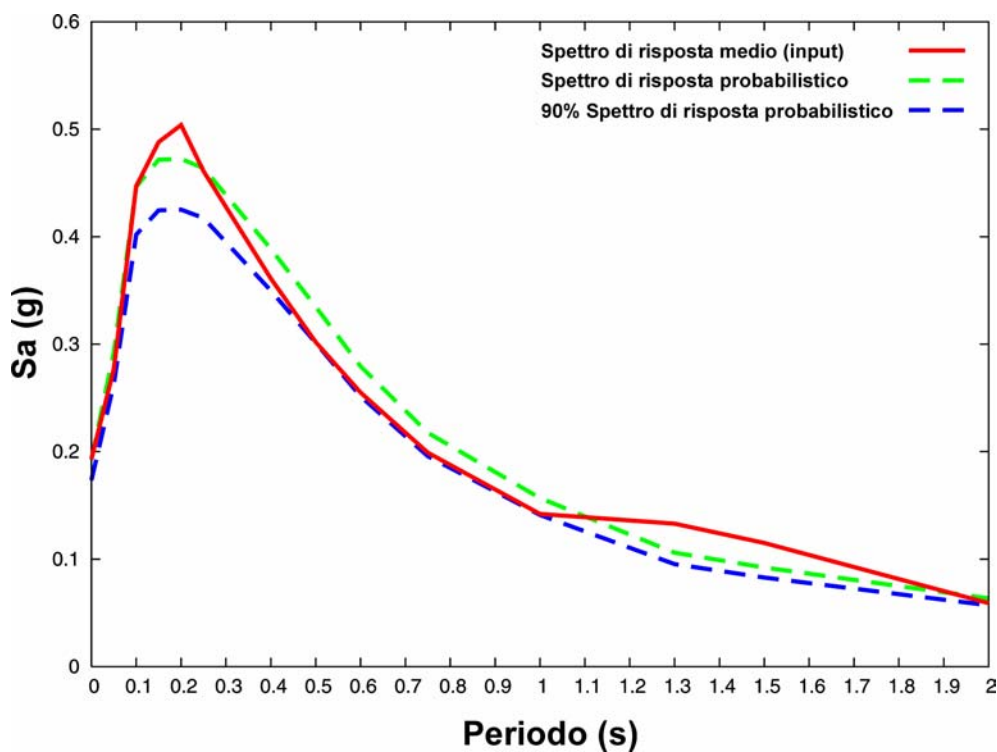


**Figura 16** Input sismico per in Comuni in Zona 2B Est: gruppo di 7 accelerogrammi (componente orizzontale) selezionati allo scopo di riprodurre lo spettro di risposta a pericolosità uniforme di riferimento.





**Figura 17** Spettri di risposta dei 7 accelerogrammi selezionati. La figura mostra i diversi contributi, in termini di ordinate spettrali, da parte dei singoli accelerogrammi.



**Figura 18** Confronto tra lo spettro di risposta medio dei 7 accelerogrammi (linea rossa), lo spettro di risposta probabilistico (linea verde tratteggiata) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni e il suo 90% (linea blu tratteggiata).

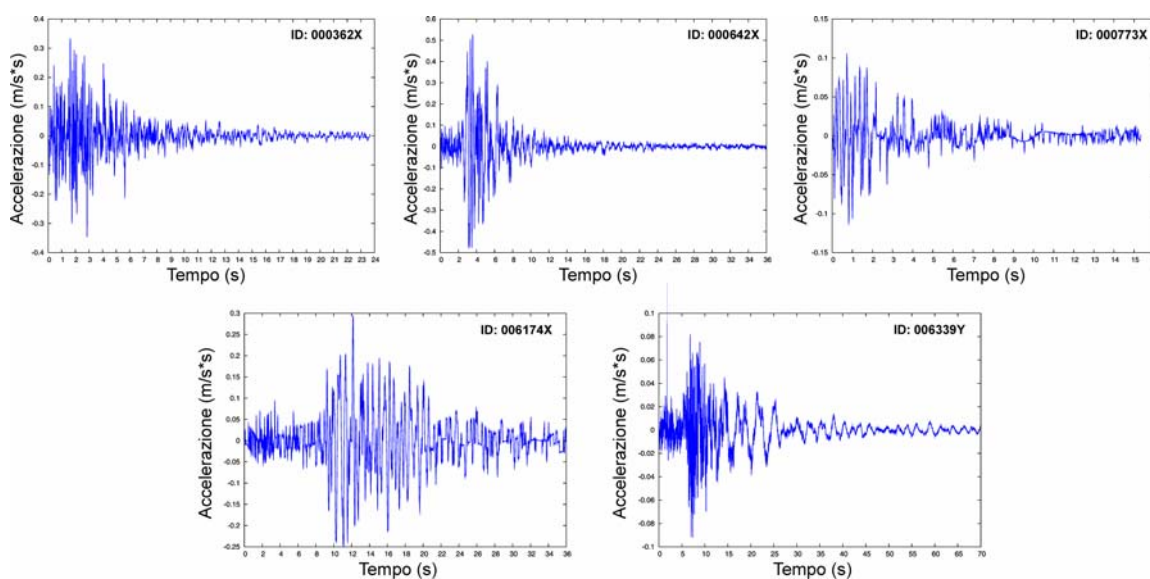
In figura 17 sono rappresentati gli spettri di risposta dei singoli accelerogrammi selezionati, tutti ancorati allo stesso valore di  $a_g$  (0.193g) e relativi ad uno smorzamento  $\xi$  del 5% mentre in figura 18 è illustrato il confronto tra lo spettro di risposta medio dei 7 accelerogrammi e lo spettro probabilistico per un periodo di ritorno di 475 anni.

### 2.3.4 COMUNI IN ZONA 2B NORD

In tabella 11 sono riassunti i parametri sismologici dei cinque accelerogrammi selezionati quale input sismico per le analisi numeriche di risposta sismica dei siti afferenti ai Comuni in Zona 2B – settore settentrionale. Le *time histories* di tali accelerogrammi sono mostrate in figura 19. Sebbene costituito da un numero inferiore di accelerogrammi rispetto ad altre zone, l'input sismico elaborato è quello che fornisce la miglior compatibilità con lo spettro iso-probabile di riferimento.

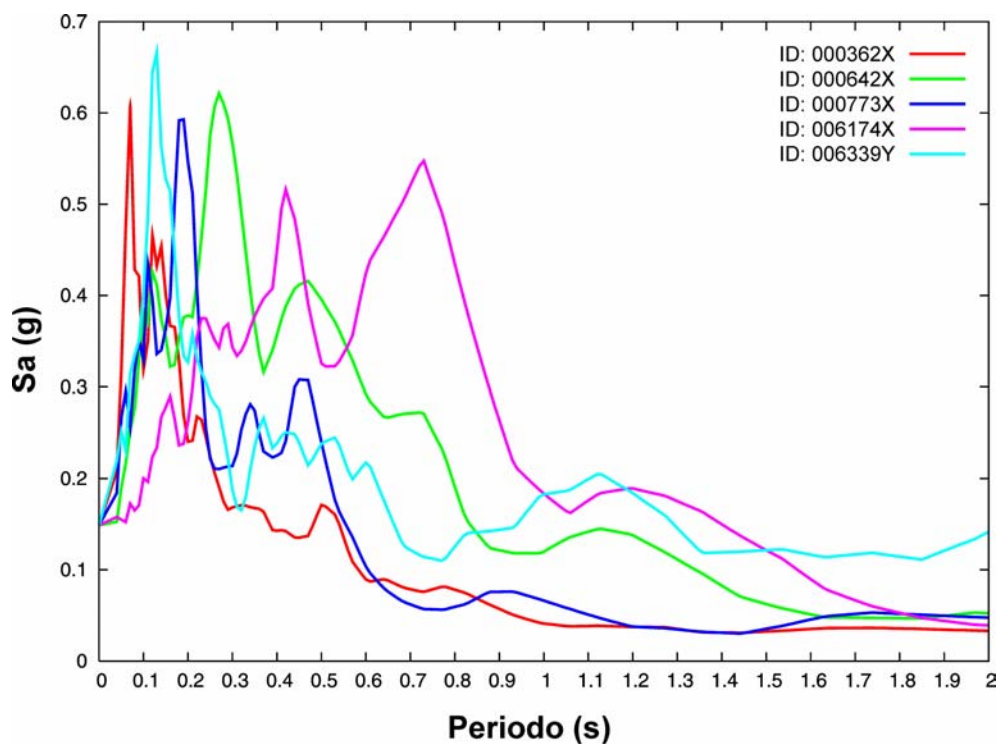
**Tabella 11** Parametri dei terremoti selezionati quale input sismico per le analisi numeriche di risposta sismica dei siti in Zona 2B Nord.

ID	Nome	Nazione	Data	Lat. Epicentro	Long. Epicentro	$M_w$	$M_s$	$M_l$	Dist. Epic. (km)
000362X	Umbria	Italy	29/04/1984	43.2 N	12.59 E	5.6	5.4	5.4	27
000642X	Umbria-Marche (aftershock)	Italy	14/10/1997	42.92 N	12.93 E	5.6	5.6	5.5	23
000773X	Umbria-Marche (aftershock)	Italy	03/10/1997	43.03 N	12.84 E	5.3	4.9	5.1	28
006174X	Kozani	Greece	13/05/1995	40.18 N	21.66 E	6.5	6.5	-	60
0006339Y	South Iceland (aftershock)	Iceland	21/06/2000	63.97 N	20.71 W	6.4	6.6	6.4	61

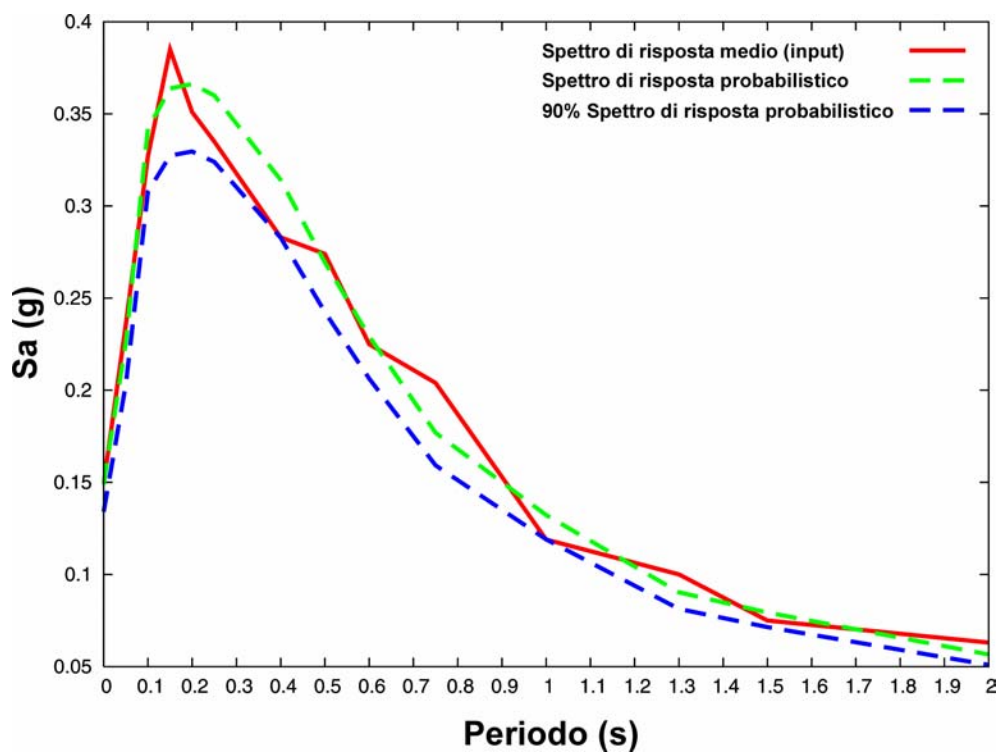


**Figura 19** Input sismico per in Comuni in Zona 2B Nord: gruppo di 5 accelerogrammi (componente orizzontale) selezionati allo scopo di riprodurre lo spettro di risposta a pericolosità uniforme di riferimento.





**Figura 20** Spettri di risposta dei 5 accelerogrammi selezionati. La figura mostra i diversi contributi, in termini di ordinate spettrali, da parte dei singoli accelerogrammi.



**Figura 21** Confronto tra lo spettro di risposta medio dei 5 accelerogrammi (linea rossa), lo spettro di risposta probabilistico (linea verde tratteggiata) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni e il suo 90% (linea blu tratteggiata).

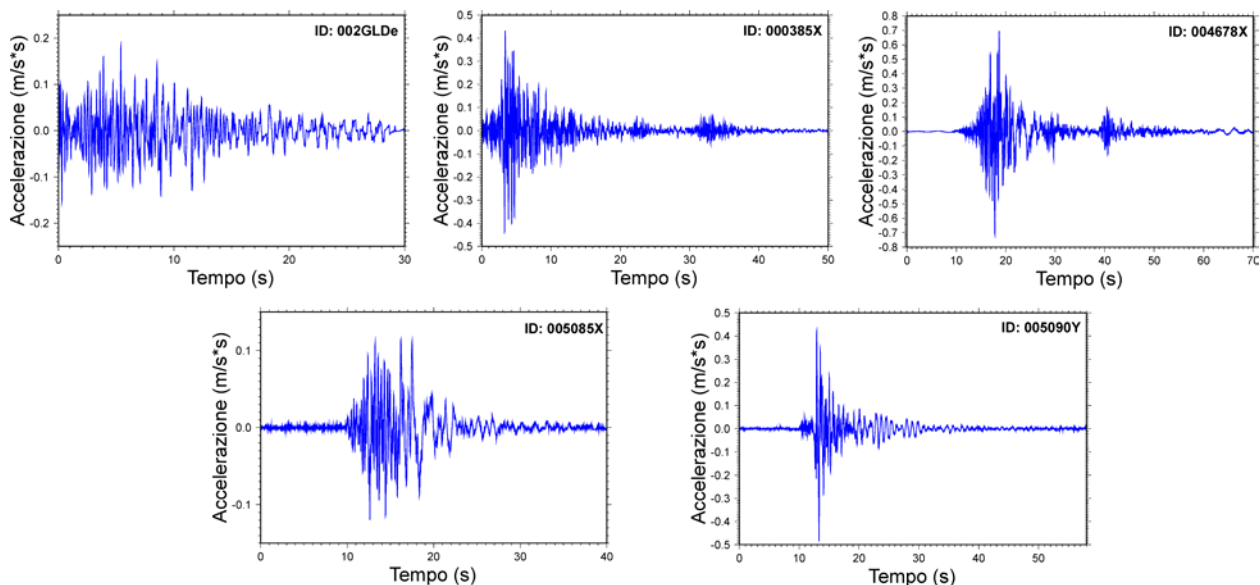
In figura 20 sono rappresentati gli spettri di risposta dei singoli accelerogrammi selezionati, tutti ancorati allo stesso valore di  $a_g$  (0.149g) e relativi ad uno smorzamento  $\xi$  del 5% mentre in figura 21 è illustrato il confronto tra lo spettro di risposta medio dei 5 accelerogrammi e lo spettro probabilistico per un periodo di ritorno di 475 anni.

### 2.3.5 COMUNI DEL CRATERE

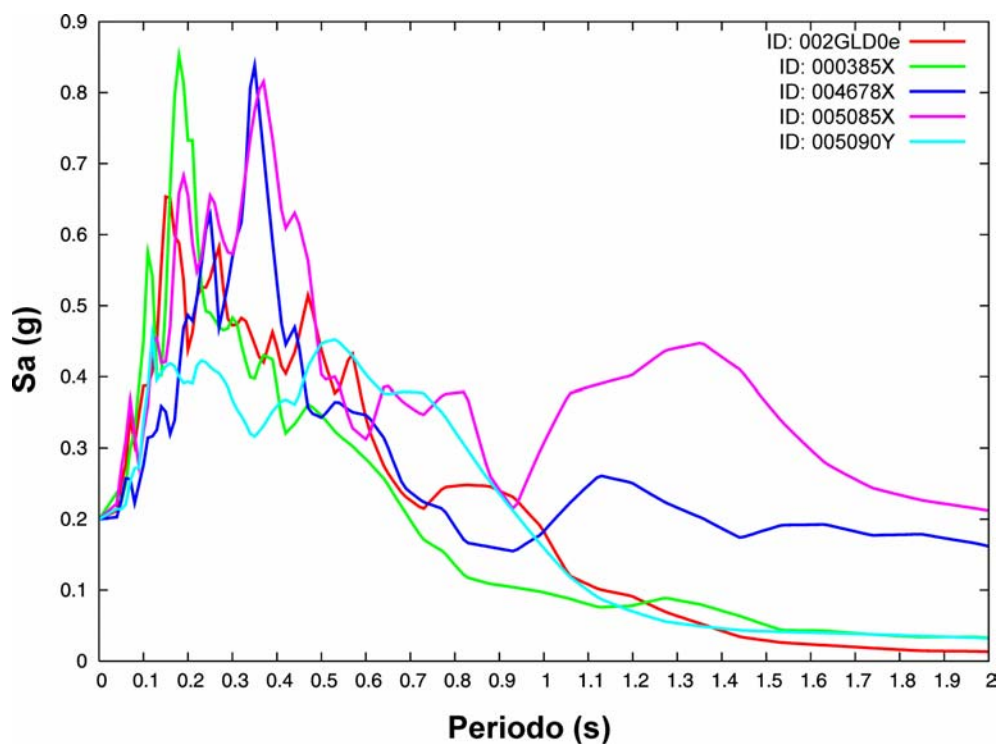
In tabella 12 sono riassunti i parametri sismologici degli accelerogrammi selezionati quale input sismico per le analisi numeriche di risposta sismica dei siti afferenti all'area del "cratere". Le *time histories* di tali accelerogrammi sono mostrate in figura 22.

**Tabella 12** Parametri dei terremoti selezionati quale input sismico per le analisi numeriche di risposta sismica dei siti in afferenti all'area del "cratere".

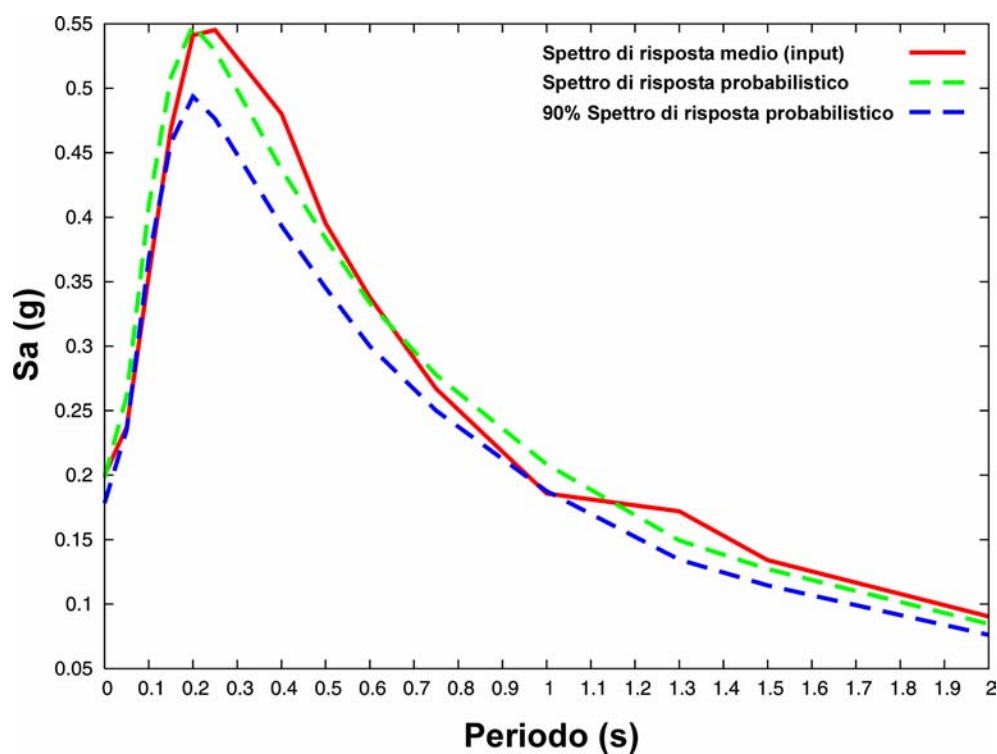
ID	Nome	Nazione	Data	Lat. Epicentro	Long. Epicentro	$M_w$	$M_s$	$M_l$	Dist. Epic. (km)
002GLD0e	Molise	Italy	01/11/2002	41.719 N	14.840 W	-	-	5.3	20
000385X	Lazio Abruzzo (aftershock)	Italy	11/05/1984	41.7318 N	13.921 E	5.5	5.27	5.1	15
004678X	South Iceland	Iceland	17/06/2000	63.97 N	20.360 W	6.5	6.6	-	32
005085X	Mt. Hengill Area	Iceland	04/06/1998	64.036 N	21.293 W	5.4	5.2	4.7	15
005090Y	Mt. Hengill Area	Iceland	04/06/1998	64.036 N	21.293 W	5.4	5.2	4.7	18



**Figura 22** Input sismico per in Comuni del "cratere": gruppo di 5 accelerogrammi (componente orizzontale) selezionati allo scopo di riprodurre lo spettro di risposta a pericolosità uniforme di riferimento.



**Figura 23** Spettri di risposta dei 5 accelerogrammi selezionati. La figura mostra i diversi contributi, in termini di ordinate spettrali, da parte dei singoli accelerogrammi.



**Figura 24** Confronto tra lo spettro di risposta medio dei 5 accelerogrammi (linea rossa), lo spettro di risposta probabilistico (linea verde tratteggiata) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni e il suo 90% (linea blu tratteggiata).

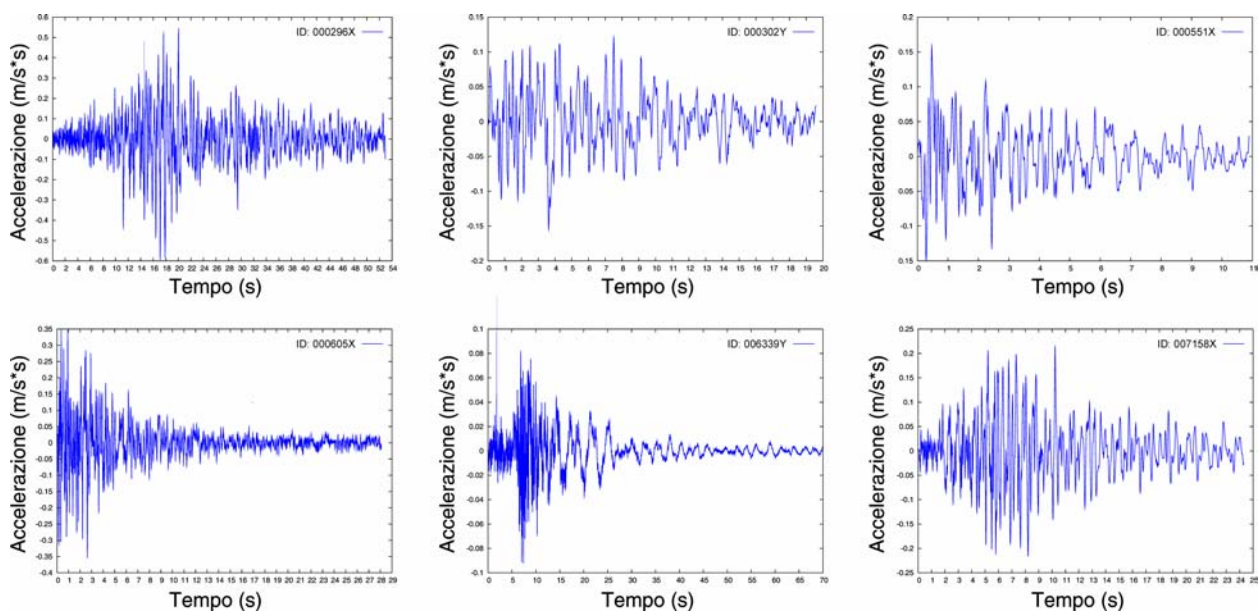
In figura 23 sono rappresentati gli spettri di risposta dei singoli accelerogrammi selezionati, tutti ancorati allo stesso valore di  $a_g$  (0.20g) e relativi ad uno smorzamento  $\xi$  del 5% mentre in figura 24 è illustrato il confronto tra lo spettro di risposta medio dei 5 accelerogrammi e lo spettro probabilistico per un periodo di ritorno di 475 anni.

### 2.3.6 COMUNI IN ZONA 3

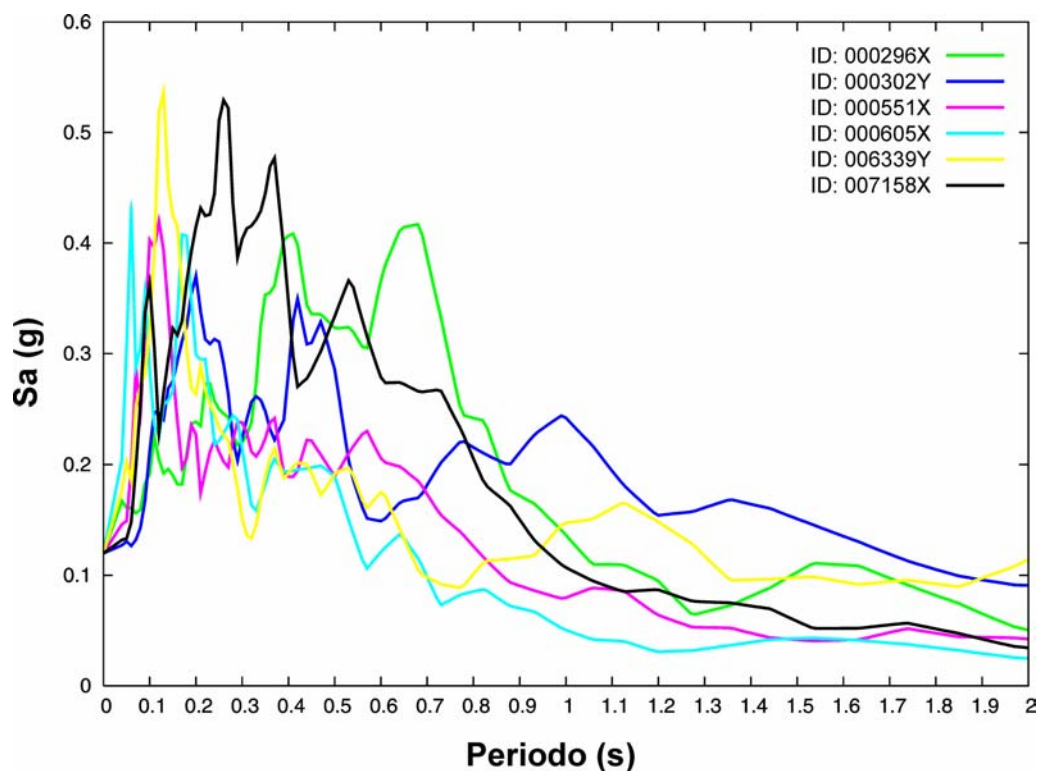
In tabella 13 sono riassunti i parametri sismologici degli accelerogrammi selezionati quale input sismico per le analisi numeriche di risposta sismica dei siti afferenti ai Comuni in Zona 3. Le *time histories* di tali accelerogrammi sono mostrate in figura 25.

**Tabella 13** Parametri dei terremoti selezionati quale input sismico per le analisi numeriche di risposta sismica dei siti in Zona 3.

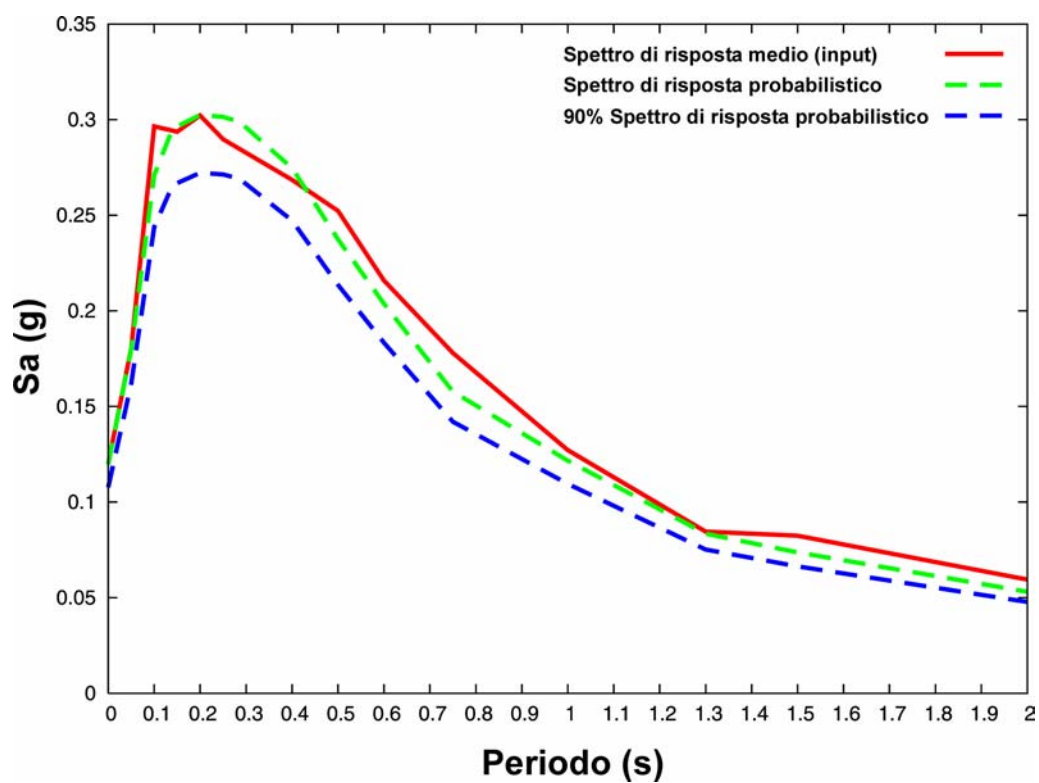
ID	Nome	Nazione	Data	Lat. Epicentro	Long. Epicentro	$M_w$	$M_s$	$M_l$	Dist. Epic. (km)
000296X	Campano-Lucano	Italy	23/11/1980	40.78 N	15.33 E	6.9	6.9	6.6	64
000302Y	Campano-Lucano	Italy	23/11/1980	40.78 N	15.33 E	6.9	6.9	6.6	72
000551X	Tithorea	Greece	18/11/1992	38.26 N	22.37 E	5.9	5.7	5.4	37
000605X	Umbria-Marche	Italy	26/09/1997	43.02 N	12.89 E	5.7	5.5	5.6	35
006339Y	South Iceland (aftershock)	Iceland	21/06/2000	63.97 N	20.71 W	6.4	6.6	6.4	61
007158X	Firuzabad	Southern Iran	20/06/1994	29.01 N	52.64 E	5.9	5.8	-	39



**Figura 25** Input sismico per in Comuni in Zona 3: gruppo di 6 accelerogrammi (componente orizzontale) selezionati allo scopo di riprodurre lo spettro di risposta a pericolosità uniforme di riferimento.



**Figura 26** Spettri di risposta dei 6 accelerogrammi selezionati. La figura mostra i diversi contributi, in termini di ordinate spettrali, da parte dei singoli accelerogrammi.



**Figura 27** Confronto tra lo spettro di risposta medio dei 6 accelerogrammi (linea rossa), lo spettro di risposta probabilistico (linea verde tratteggiata) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni e il suo 90% (linea blu tratteggiata).

In figura 26 sono rappresentati gli spettri di risposta dei singoli accelerogrammi selezionati, tutti ancorati allo stesso valore di  $a_g$  (0.120g) e relativi ad uno smorzamento  $\xi$  del 5% mentre in figura 27 è illustrato il confronto tra lo spettro di risposta medio dei 6 accelerogrammi e lo spettro probabilistico per un periodo di ritorno di 475 anni.



### **3 DETERMINAZIONE DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE E MICROZONAZIONE SISMICA (VALUTAZIONE DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE)**

La microzonazione sismica, che deve essere vista come uno strumento di base propedeutico alle attività di progettazione e di ricostruzione, ha lo scopo di riconoscere ad una scala sufficientemente di dettaglio le condizioni di sito che possono modificare sensibilmente le caratteristiche del moto sismico o possono produrre effetti cosismici rilevanti (fratture, frane, liquefazioni, ecc.).

In sostanza lo studio di microzonazione restituisce una mappa del territorio nel quale sono indicate:

- le zone in cui il moto sismico viene amplificato (indicando per quali frequenze avviene l'amplificazione) a causa delle caratteristiche morfologiche, strutturali, stratigrafiche, geofisiche e geotecniche dei terreni;
- le zone in cui sono presenti, o sono suscettibili di attivazione, dissesti o deformazioni del suolo dovuti al sisma.

Come noto, le caratteristiche geologiche e litotecniche dei siti possono fortemente influenzare la forma dello spettro di risposta elastico (la normativa vigente definisce tre diversi spettri a seconda delle caratteristiche del suolo considerato).

In generale per la determinazione degli effetti di sito o della risposta sismica locale si può procedere per via speditiva o per approfondimenti successivi. Le analisi speditive consistono generalmente in studi geologici e geomorfologici più o meno dettagliati mentre i successivi approfondimenti richiedono l'applicazione di analisi numeriche a complessità crescente. La complessità è prevalentemente dovuta alla necessità di conoscere a priori una serie di parametri necessari per la modellazione delle colonne stratigrafiche (definizione delle sezioni da modellare con la necessità di reperimento dei parametri geotecnici e geofisici quali velocità onde S, velocità onde P, modulo di taglio, coefficiente di Poisson, coefficiente di smorzamento, densità, ecc.).

Nel presente studio in cui sono previste le caratterizzazioni geologico-stratigrafica, geomorfologica e litotecnica delle aree d'interesse, oltre ad una serie di indagini speditive, si è proceduto ad un'analisi di tipo numerico: definite le formazioni geologiche che interessavano ciascun territorio comunale in base a prove in sito, si è potuto procedere ad associare a ciascuna formazione i parametri geotecnici richiesti dalla normativa (valori di  $V_s$  per ciascun litotipo e  $V_{s,30}$  per ciascuna stratigrafia) e successivamente a campione (per ciascun sondaggio) si è proceduto ad una modellazione numerica 1D.

### 3.1 CARATTERIZZAZIONE DEI MODELLI DELLE COLONNE STRATIGRAFICHE

Tutte le informazioni ottenute da sondaggi geognostici, prove geofisiche in foro (down-hole), indagini sismiche a rifrazione e misure di microtremore (curve H/V; Nakamura, 1989) hanno permesso di caratterizzare le situazioni lito-stratigrafiche locali. In particolare, in corrispondenza, di ogni sondaggio, in cui è stata eseguita una prova down-hole, sono state definite le colonne stratigrafiche, utilizzando sia le informazioni geotecniche ottenute dai campioni prelevati durante le perforazioni e analizzati in laboratorio sia i risultati delle prove geofisiche stesse. In tal modo è stato possibile stimare in modo quantitativo la velocità media delle onde di taglio  $V_s$ , i parametri geotecnici (peso di unità di volume, granulometria) dei differenti materiali e valutare per ogni sondaggio considerato gli spessori delle diverse formazioni litotecniche.

Nella definizione delle caratteristiche geotecniche delle diverse formazioni sono state considerate le curve che definiscono la variazione del modulo di resistenza al taglio ( $G/G_0$ ) in funzione della deformazione  $\gamma$  e quelle dello smorzamento ( $D$ ) in funzione di  $\gamma$ . A tal scopo, in aggiunta ai parametri forniti dal software impiegato per le simulazioni numeriche, sono stati utilizzati i dati ottenuti da prove di laboratorio specifiche (taglio ciclico e colonna risonante) effettuate su:

- due campioni prelevati durante i sondaggi realizzati nei Comuni di Baranello e Colle d'Anchise nell'ambito della microzonazione sismica dei Comuni della Provincia di Campobasso (i risultati delle prove di laboratorio sono commentati di seguito);
- campioni prelevati nella campagna geognostica relativa alla Microzonazione sismica di San Giuliano di Puglia (SSN, 2003);
- materiali prelevati durante la campagna geognostica relativa agli studi di microzonazione sismica del Comune di Fabriano (Crespellani et al., 2000).

Le indagini geologiche e geotecniche effettuate presso ciascun Comune ed in particolare i sondaggi completi di test down-hole e prove di laboratorio su diversi campioni hanno permesso di associare a ciascun punto misura considerato un modello 1D della colonna stratigrafica. Tale modello è definito come una successione di strati omogenei caratterizzati ciascuno da una velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio ( $V_s$ ), da un peso di volume  $\rho$ , da un modulo di resistenza al taglio iniziale  $G_0$  e da un determinato tipo di risposta alle sollecitazioni in campo dinamico (curve di damping e del modulo di resistenza al taglio).

Come detto precedentemente, i campioni indisturbati prelevati durante le campagne geognostiche tenute nei Comuni di Baranello e Colle d'Anchise sono stati analizzati in laboratorio per la determinazione del loro comportamento in condizioni dinamiche, sottoponendoli sia a prove di taglio ciclico che di colonna risonante. Tali campioni sono rappresentativi di due livelli di terreno



sciolti derivati dall'alterazione di due membri differenti della medesima Formazione (Flysch di San Bartolomeo - San 2a). Nelle tabelle e nelle figure seguenti sono riportati i risultati delle prove suddette.

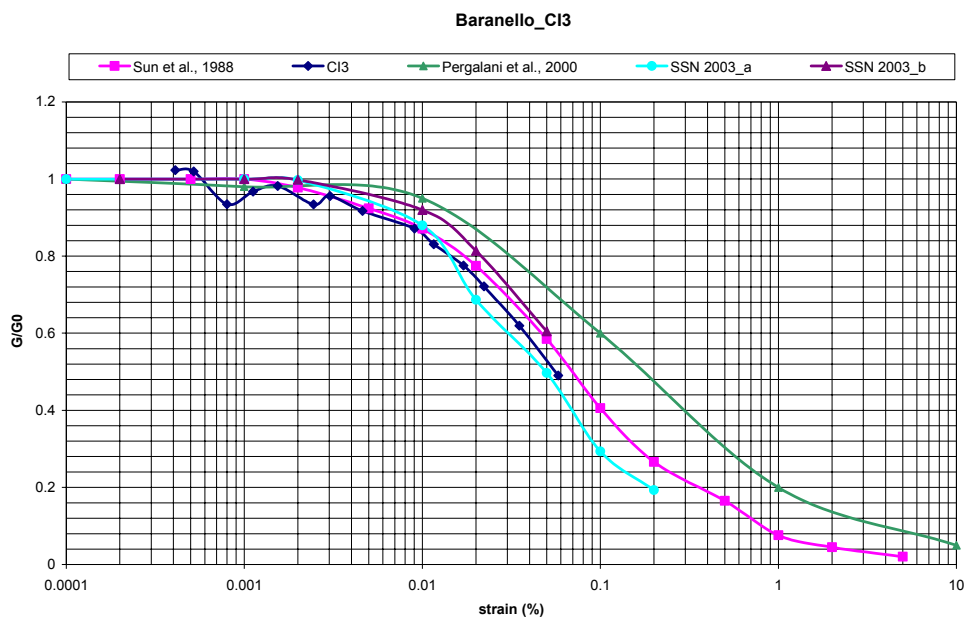
### **- Comune di Baranello:**

I dati si riferiscono al campione indisturbato C13 relativo ad una profondità di 16.25-16.35m del sondaggio S1. In tabella 15 sono riportati i valori di alcune proprietà fisico-meccaniche così come ottenute dalle prove a taglio ciclico. Nelle figure 28 e 29 sono rappresentate le curve che definiscono la variazione del modulo di resistenza al taglio ( $G/G_0$ ) in funzione della deformazione  $\gamma$  e quelle dello smorzamento (D) sempre in funzione dello strain  $\gamma$  sotto l'azione del taglio ciclico. A titolo di confronto, nelle figure sono riportate curve relative a materiali analoghi derivate da letteratura ed impiegate in simulazioni numeriche per altri siti.

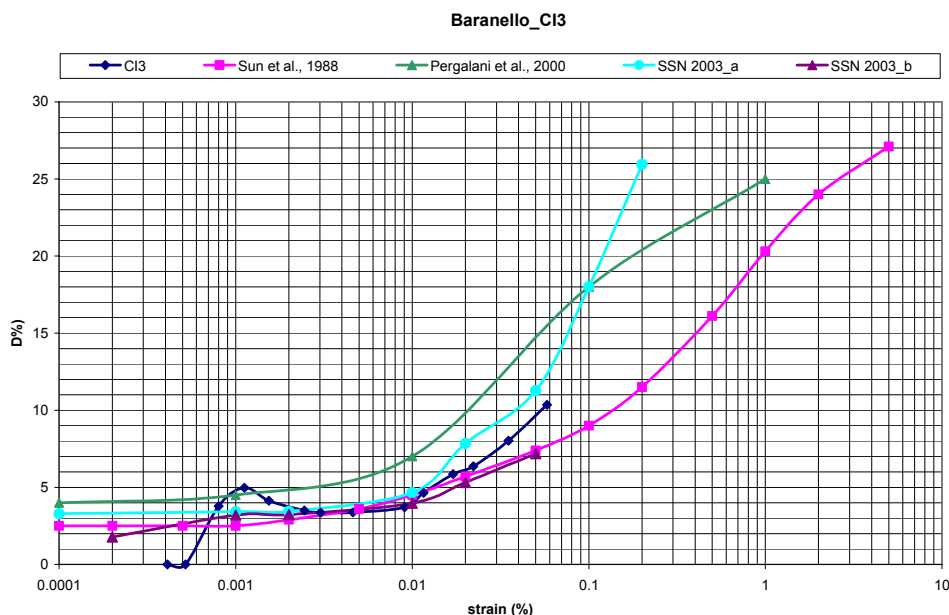
**Tabella 14** Parametri del campione prelevato nel Comune di Baranello (Sondaggio S1 – Campione C13; Profondità prelievo: 16.0-16.5m).  $\gamma_1$ = peso di volume;  $w_1$ =contenuto d'acqua; IP= indice di plasticità;  $G_{s1}$ = peso specifico dei grani;  $V_p$  = velocità delle onde longitudinali;  $V_s$  = velocità delle onde di taglio; G = modulo di resistenza al taglio;  $G/G_0$  = rapporto del modulo di taglio;  $\gamma$  = deformazione subita dal campione; D = smorzamento (damping).

Descrizione	$\gamma_1$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_1$ %	IP %	$G_{s1}$ (t/m <sup>3</sup> )	$V_p$ (m/s)	$V_s$ (m/s)
Argilla con limo con sabbia bruno grigiastro scuro (alterazione San2a)	20.67	Umidità= 14	Liquido= 36 Plastico= 17	2.739	1700	360

G (MPa)	$G/G_0$	$\gamma$ (%)	D (%)
106.28	1.023	0.00041	0
105.85	1.0194	0.00052	0
97.05	0.9346	0.00080	3.781
100.45	0.96738	0.00112	4.971
101.95	0.98183	0.00154	4.125
97	0.93415	0.00245	3.507
99.24	0.95577	0.00303	3.368
95.24	0.91723	0.00461	3.376
90.46	0.87119	0.00904	3.706
86.29	0.83107	0.01161	4.646
80.54	0.77585	0.01702	5.858
74.9	0.72138	0.02219	6.361
64.33	0.6195	0.03506	8.030
50.92	0.4904	0.05795	10.352



**Figura 28** Confronto tra la curva di variazione del rapporto del modulo di resistenza al taglio ( $G/G_0$ ) in funzione della deformazione (*strain*) ottenuta dalle prove di laboratorio (Taglio Ciclico) per il campione CI3 prelevato nel Comune di Baranello (linea blu), la curva fornita dal software di calcolo ProShake (EduPro Civil Systems, 2003; Schnabel et al., 1972; Idriss and Sun, 1992) per un materiale con le stesse caratteristiche (linea rosa) e varie curve ricavate da dati bibliografici (linee verde, linea azzurra e linea marrone).

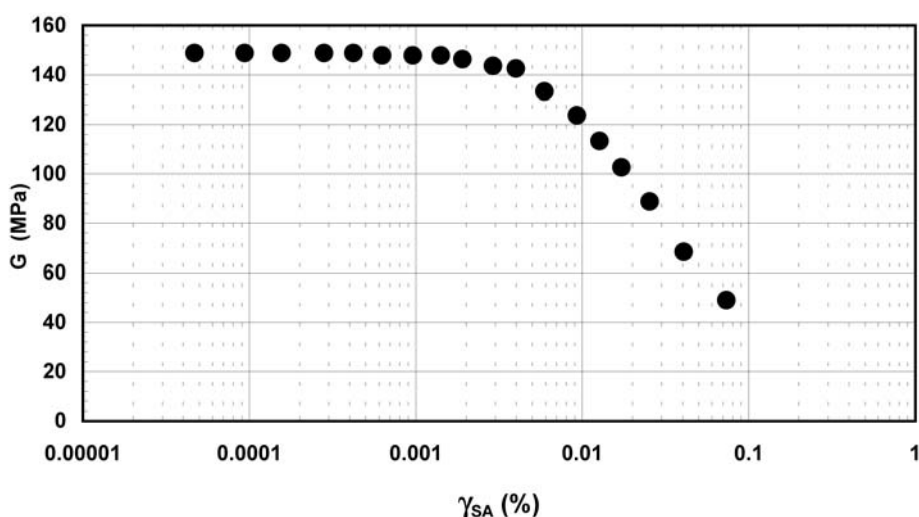


**Figura 29** Confronto tra la curva di variazione dello smorzamento ( $D$ ) in funzione della deformazione (*strain*) ottenuta da prove di laboratorio (Taglio Ciclico) per il campione CI3 prelevato nel Comune di Baranello (linea blu), la curva fornita dal software di calcolo ProShake (EduPro Civil Systems, 2003; Schnabel et al., 1972; Idriss and Sun, 1992) per un materiale con le stesse caratteristiche (linea rosa) e varie curve ricavate da dati bibliografici (linea verde, linea azzurra e linea marrone).

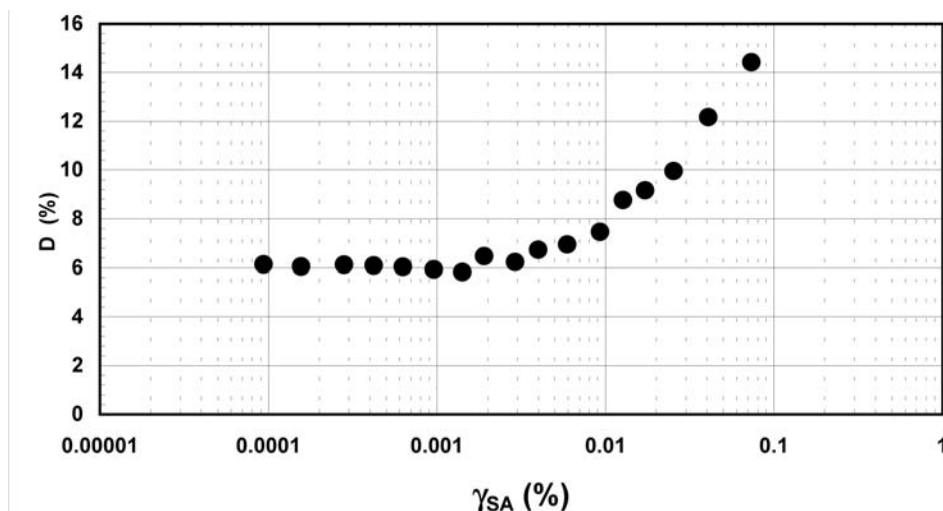
Sullo stesso campione sono state eseguite prove di laboratorio a colonna risonante che forniscono curve più stabili e regolari come evidenziato in tabella 16 e nelle figure 30 e 31 (per ulteriori approfondimenti si rimanda alla relazione ISMES).

**Tabella 15** Valori numerici delle curve rappresentanti la variazione del modulo di resistenza al taglio ( $G$ ), del rapporto  $G/G_{max}$  e dello smorzamento ( $D$ ) rispetto alla deformazione ( $\gamma$ ) (ved. figure 30 e 31). I valori si riferiscono al campione CI3 su cui sono state effettuate prove di laboratorio a colonna risonante.

$G$	$G/G_{MAX}$	$\gamma$	$D$
(MPa)	(-)	(%)	(%)
148.80	1.000	0.00005	-
148.80	1.000	0.00009	6.13
148.76	1.000	0.00016	6.05
148.76	1.000	0.00028	6.12
148.76	1.000	0.00042	6.09
147.82	0.993	0.00063	6.03
147.82	0.993	0.00096	5.94
147.82	0.993	0.00141	5.82
146.31	0.983	0.00191	6.47
143.60	0.965	0.00291	6.22
142.57	0.958	0.00399	6.73
133.32	0.896	0.00592	6.95
123.73	0.832	0.00929	7.46
113.35	0.762	0.01271	8.76
102.68	0.690	0.01719	9.16
88.80	0.597	0.02538	9.95
68.43	0.460	0.04074	12.17
49.01	0.329	0.07348	14.43



**Figura 30** Variazione del modulo di resistenza al taglio ( $G$ ) in funzione della deformazione di taglio in singola ampiezza ( $\gamma_{SA}$ ). Curva relativa al campione CI3 prelevato presso il Comune di Baranello.



**Figura 31** Variazione dello smorzamento (D) in funzione della deformazione di taglio in singola ampiezza ( $\gamma_{SA}$ ). Curva relativa al campione C13 prelevato presso il Comune di Baranello.

### - Comune di Colle d'Anchise:

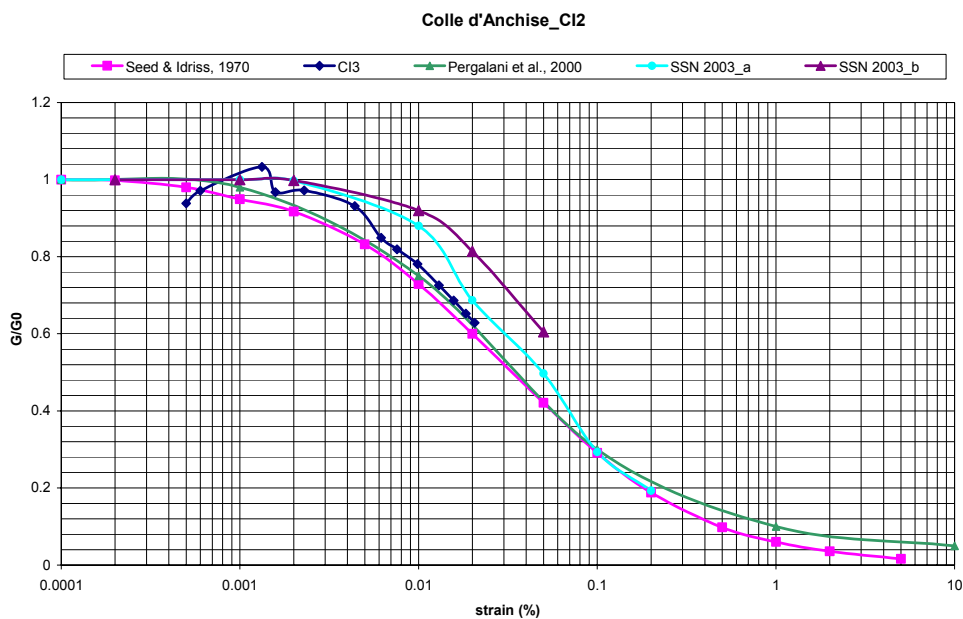
I dati si riferiscono al campione indisturbato C12 relativo ad una profondità di 10.70-10.82m del sondaggio S1. In tabella 17 sono riportati i valori di alcune proprietà fisico-meccaniche così come ottenute dalle prove a taglio ciclico. Nelle figure 32 e 33 sono rappresentate le curve che definiscono la variazione del modulo di resistenza al taglio ( $G/G_0$ ) e dello smorzamento (D) in funzione della deformazione  $\gamma$  sotto l'azione del taglio ciclico. A titolo di confronto, nelle figure sono riportate curve relative a materiali analoghi derivate da letteratura e impiegate in simulazioni numeriche per altri siti.

**Tabella 16** Parametri del campione prelevato nel Comune di Colle d'Anchise (Sondaggio S1 – Campione C12; Profondità prelievo: 10.4-11.0 m).  $\gamma_l$ = peso di volume;  $w_l$ =contenuto d'acqua; IP= indice di plasticità;  $G_{s1}$ = peso specifico dei grani;  $V_p$  = velocità onde compressionali;  $V_s$  = velocità onde di taglio; G = modulo di resistenza al taglio;  $G/G_0$  = rapporto del modulo di taglio;  $\gamma$  = deformazione subita dal campione; D = smorzamento (damping).

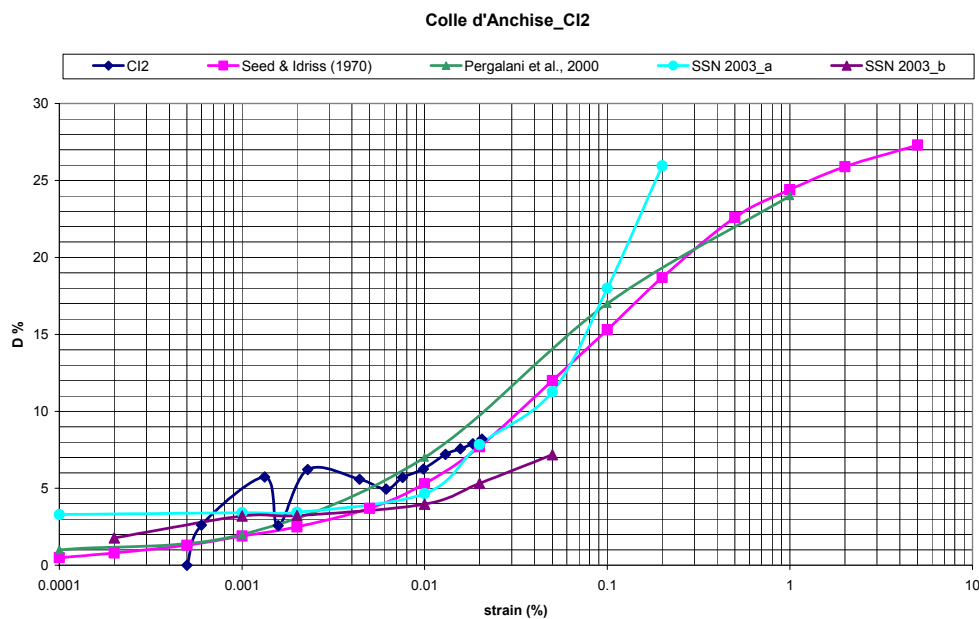
Descrizione	$\gamma_l$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_l$ %	IP %	$G_{s1}$ (t/m <sup>3</sup> )	$V_p$ (m/s)	$V_s$ (m/s)
Sabbia angolare sub angolare limosa deb. Ghiaiosa deb. Argillosa bruno giallastro chiara (alterazione San2a)	19.94	Umidità = 11	Liquido= - Plastico= -	2.722	1900	460

G (MPa)	$G/G_0$	$\gamma$ (%)	D (%)
188.34	0.9383	0.0005	0
194.90	0.97096	0.0006	2.614
207.34	1.03291	0.00133	5.733
194.18	0.96735	0.00158	2.571

195.12	0.97207	0.00229	6.215
186.86	0.93089	0.0044	5.590
170.43	0.84907	0.00616	4.947
164.46	0.81929	0.00757	5.702
156.76	0.78095	0.00985	6.253
145.73	0.72602	0.013	7.210
137.83	0.68663	0.01569	7.570
130.94	0.6523	0.01836	7.896
126.20	0.62872	0.02058	8.193



**Figura 32** Confronto tra la curva di variazione del rapporto del modulo di resistenza al taglio ( $G/G_0$ ) in funzione della deformazione (*strain*) ottenuta da prove di laboratorio (Taglio Ciclico) per il campione CI2 prelevato nel Comune di Colle d'Anchise (linea blu), la curva fornita dal software di calcolo per un materiale con le stesse caratteristiche (linea rosa) e varie curve ricavate da dati bibliografici (linee verde, linea azzurra e linea marrone).

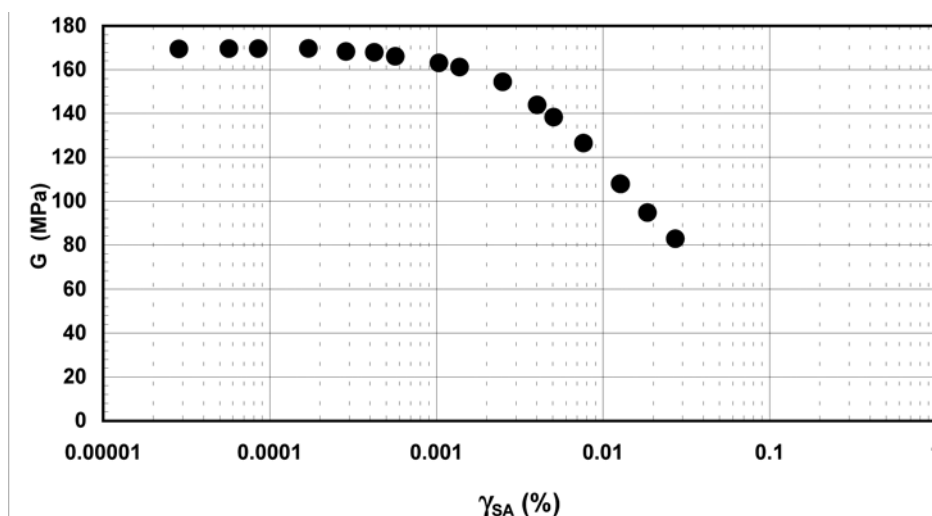


**Figura 33** Confronto tra la curva di variazione dello smorzamento (D) in funzione della deformazione (*strain*) ottenuta da prove di laboratorio (Taglio Ciclico) per il campione CI2 prelevato nel Comune di Colle d’Anchise (linea blu), la curva fornita dal software per un materiale con le stesse caratteristiche (linea rosa) e la curve ricavate da dati bibliografici (linea verde, linea azzurra e linea marrone).

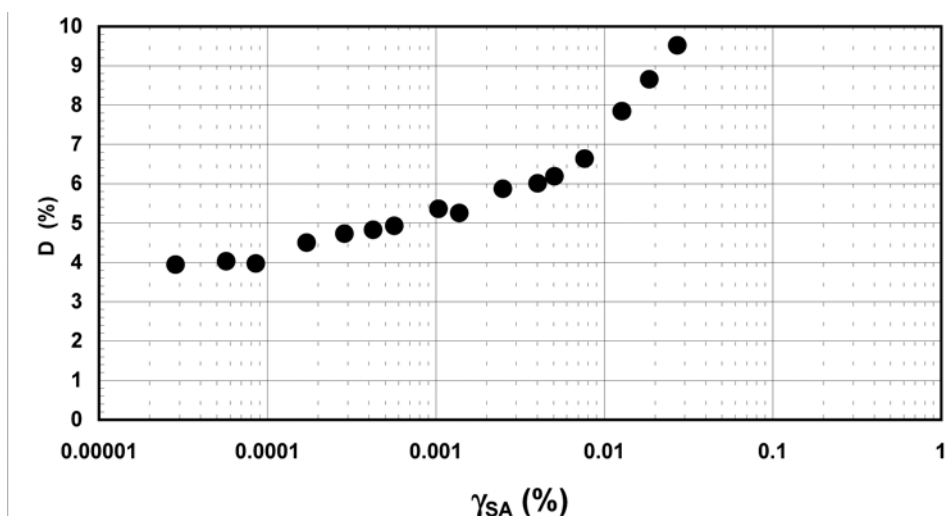
Sullo stesso campione sono state eseguite prove di laboratorio a colonna risonante che forniscono curve più stabili e regolari come evidenziato in tabella 18 e nelle figure 34 e 35 (per ulteriori approfondimenti si rimanda alla relazione ISMES).

**Tabella 17** Valori numerici delle curve rappresentanti la variazione del modulo di resistenza al taglio (G), del rapporto  $G/G_{MAX}$  e dello smorzamento (D) rispetto alla deformazione ( $\gamma$ ) (ved. figure 34 e 35). I valori si riferiscono al campione CI2 su cui sono state effettuate prove di laboratorio a colonna risonante.

G	$G/G_{MAX}$	$\gamma$	D
(MPa)	(-)	(%)	(%)
169.42	1.000	0.00003	3.94
169.57	1.001	0.00006	4.03
169.61	1.001	0.00009	3.97
169.65	1.001	0.00017	4.50
168.30	0.993	0.00029	4.73
167.93	0.991	0.00042	4.83
166.07	0.980	0.00057	4.93
163.11	0.963	0.00104	5.36
161.17	0.951	0.00138	5.26
154.40	0.911	0.00250	5.87
143.86	0.849	0.00403	6.01
138.28	0.816	0.00506	6.19
126.46	0.746	0.00764	6.64
107.77	0.636	0.01277	7.84
107.89	0.637	0.01271	7.84
94.74	0.559	0.01852	8.65
82.81	0.489	0.02718	9.52



**Figura 34** Variazione del modulo di resistenza al taglio (G) in funzione della deformazione di taglio in singola ampiezza ( $\gamma_{SA}$ ). Curva relativa al campione CI2 prelevato presso il Comune di Colle d’Anchise.



**Figura 35** Variazione dello smorzamento (D) in funzione della deformazione di taglio in singola ampiezza ( $\gamma_{SA}$ ). Curva relativa al campione C12 prelevato presso il Comune di Colle d'Anchise.

Dal confronto tra le curve ottenute dalle prove di laboratorio con quelle ricavate da bibliografia emergono differenze modeste che possono essere considerate influenti sui risultati delle analisi numeriche date le forti eterogeneità riscontrate nelle medesime formazioni. Pertanto l'impiego di queste ultime appare adeguato per l'analisi della risposta sismica dei terreni caratterizzanti le aree oggetto di studio.

### 3.2 DEFINIZIONE DEGLI EFFETTI DI AMPLIFICAZIONE SISMICA LOCALE 1D

La risposta sismica locale di ciascun sito (definita dalla frequenza fondamentale e dal livello di amplificazione) è stata determinata utilizzando un codice di simulazione numerica 1D che permette di calcolare la funzione di trasferimento di una data colonna stratigrafica ovvero il rapporto nel dominio della frequenza fra il moto sismico in superficie e il moto sismico alla base del modello. Tale approccio permette quindi di valutare come una determinata successione di litotipi di spessore variabile e con caratteristiche geologico-geotecniche differenti influisca sulla propagazione delle onde sismiche modificando il segnale sismico alla base del modello ovvero all'interfaccia tra bedrock e sedimenti.

L'impiego di modelli 1D a strati piani paralleli presenta indubbiamente dei limiti in quanto trattasi di modelli semplificati ma nel contempo presenta dei vantaggi in quanto può essere applicato su aree vaste e non richiede la conoscenza delle complesse geometrie del sottosuolo,

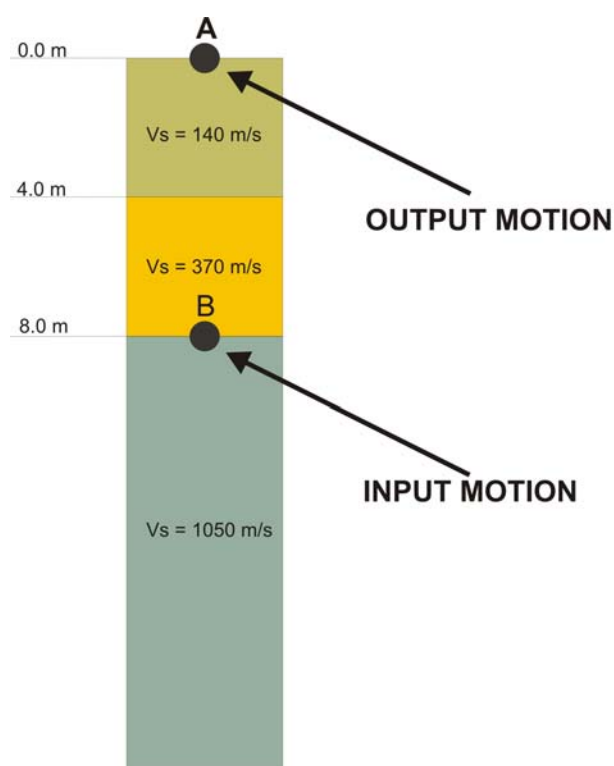


troppo spesso molto approssimate soprattutto per quanto riguarda la conoscenza dei parametri geologico-litotecnici.

Con riferimento alla stratigrafia in figura 36, la funzione di trasferimento è definita come:

$$H(f) = \frac{u_{\max}(A)}{u_{\max}(B)}$$

dove  $u_{\max}(A)$  rappresenta il moto sismico in superficie e  $u_{\max}(B)$  il moto sismico al bedrock. Nel presente studio  $u_{\max}(B)$  corrisponde al moto su roccia affiorante.



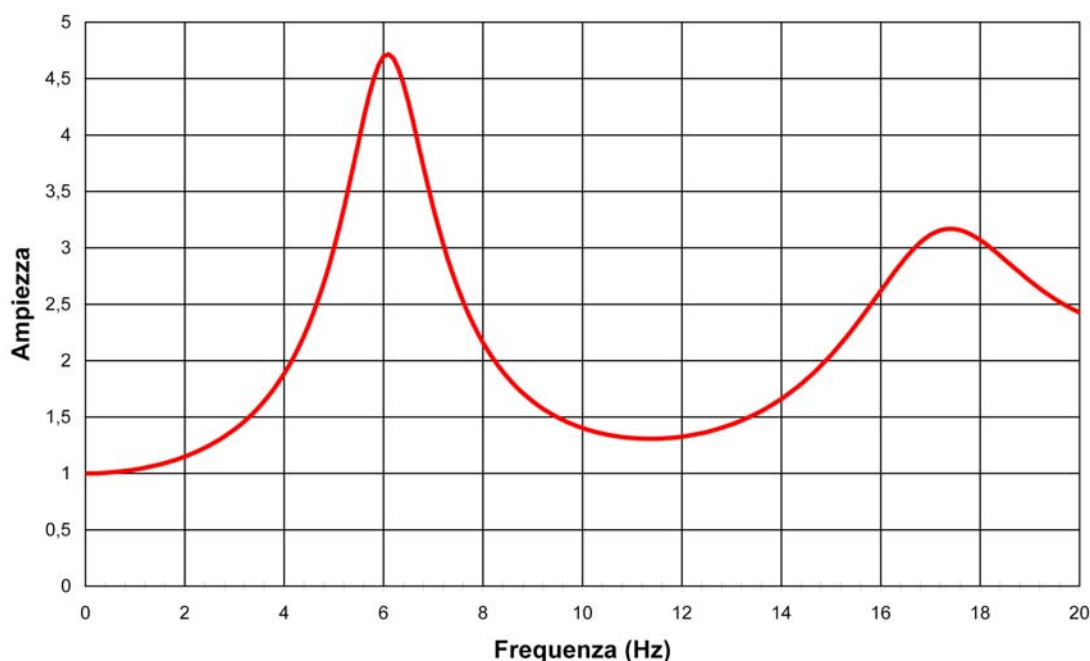
**Figura 36** Esempio di stratigrafia 1D impiegata per la valutazione della risposta sismica in superficie (punto A) dato un accelerogramma di input su roccia affiorante riportato all'interfaccia bedrock-sedimenti (punto B). Si noti che il codice di simulazione numerica 1D adottato, dato un accelerogramma registrato su roccia affiorante, calcola il moto corrispondente su roccia alla base della colonna stratigrafica.

In figura 37 è illustrata la funzione di trasferimento relativa all'esempio di stratigrafia in figura 36. La funzione di trasferimento permette quindi di definire l'effetto di sito ovvero la variazione della risposta sismica in superficie rispetto al moto sismico su roccia. L'analisi della funzione di trasferimento, determinata attraverso la simulazione numerica, permette quindi di definire per ciascun sito considerato il valore della frequenza propria di risonanza e il livello di amplificazione ad essa associato. E' bene tuttavia ricordare che l'approccio 1D permette di descrivere in modo ottimale l'effetto di sito legato alla stratigrafia locale risultando invece inefficace per la determinazione dei fenomeni di amplificazione legati a condizioni topografiche irregolari (effetto cresta, effetto scarpata) e/o altri effetti bidimensionali (effetto bacino, effetto valle).

La frequenza di risonanza determinata mediante modellazione numerica, dove possibile, è stata confrontata e verificata con i risultati sperimentali relativi ai rapporti spettrali calcolati dalle

registrazioni di microtremore (metodologia Nakamura) acquisite a seguito di precedenti campagne di misura.

Il codice di calcolo utilizzato per la definizione degli effetti di sito 1D è “ProShake – versione 1.1 (EduPro Civil Systems, 2003; Schnabel et al., 1972; Idriss and Sun, 1992)”. Tale codice di simulazione numerica permette di analizzare la risposta sismica di depositi orizzontali stratificati approssimando il comportamento non lineare e non elastico dei suoli mediante un approccio iterativo lineare equivalente.



**Figura 37** Funzione di trasferimento relativa alla stratigrafia in figura 36; da essa è possibile stimare la frequenza fondamentale del terreno e l’ amplificazione subita dallo scuotimento nel passaggio dal bedrock alla superficie.

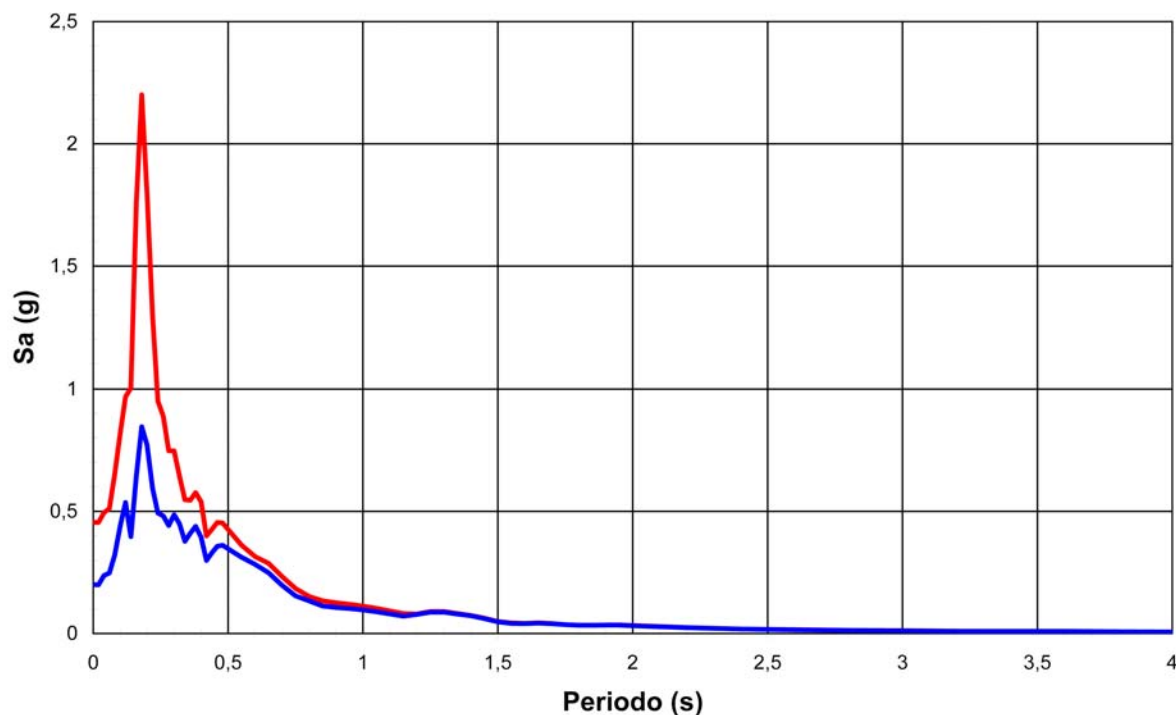
### 3.3 STIMA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE

Definiti per ciascun punto misura la frequenza di risonanza ed il livello di amplificazione, è possibile associare a ciascun sito considerato un fattore di amplificazione che può essere utilizzato come termine correttivo rispetto ai parametri di scuotimento previsti su roccia.

Una volta calcolata la funzione di trasferimento, mediante modellazione numerica, è possibile valutare il moto sismico in superficie in termini di serie di Fourier come il prodotto della funzione di trasferimento per la serie di Fourier dell’accelerogramma di input alla base del modello, da cui è possibile ottenere lo spettro di risposta elastico e lo spettro di risposta di pseudovelocità (*pseudovelocity response spectrum*). In figura 38 sono riportati gli spettri di risposta relativi al moto su roccia affiorante (curva blu) ed al moto sismico calcolato alla superficie della colonna

stratigrafica in figura 36 (curva rossa). La figura evidenzia una marcata amplificazione del moto sismico, dovuta ai contrasti d'impedenza tra bedrock e depositi superficiali, su un intervallo ristretto di periodi centrato intorno a 0.2s.

Tuttavia va evidenziato che qualora la stratigrafia locale presenti coltri superficiali rimaneggiate di scarso interesse ingegneristico (es. coltri con spessore inferiore a 5m e  $V_S$  minore di 200m/s), lo spettro di risposta elastico su soil può essere calcolato in corrispondenza dell'interfaccia tra suddette coltri e il materiale sottostante.



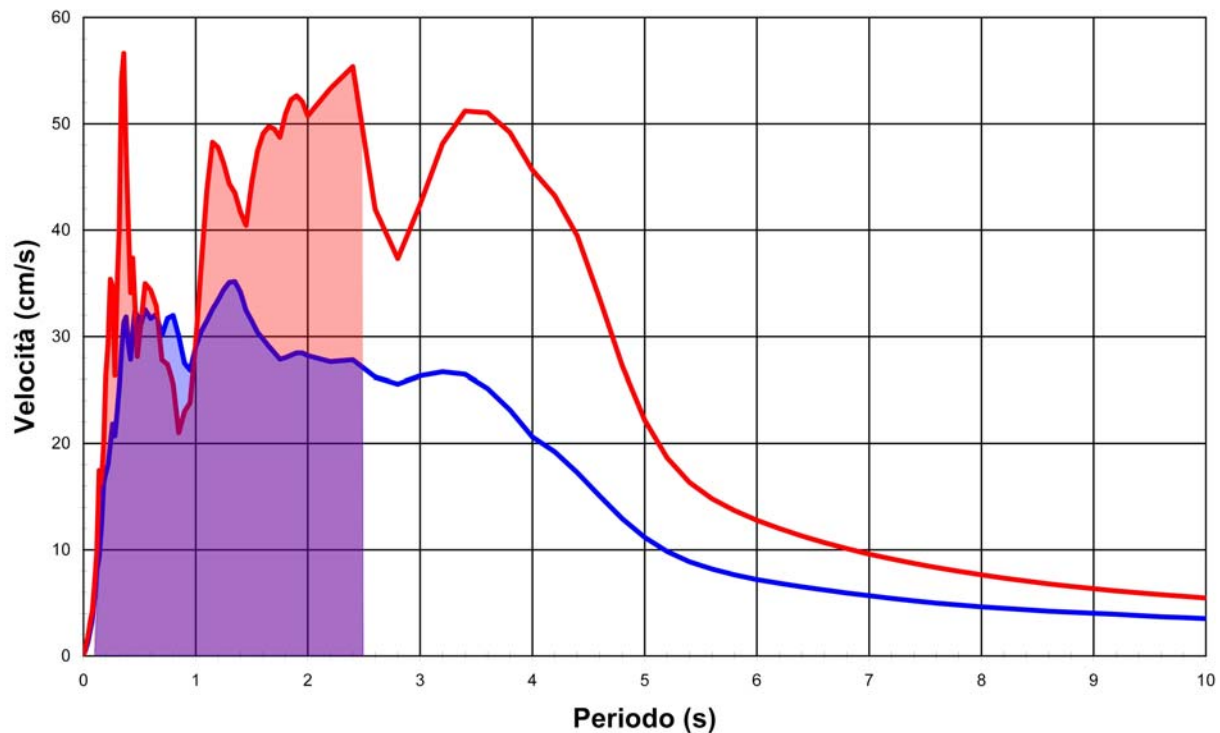
**Figura 38** Confronto tra lo spettro di risposta elastico su roccia affiorante (curva blu) e lo spettro di risposta relativo all'accelerogramma modificato dagli effetti di amplificazione (curva rossa) dovuti alla stratigrafia di figura 36.

Poiché la maggior parte delle strutture presenta periodo fondamentale,  $T$ , compreso fra 0.1 e 2.5 secondi, le ordinate spettrali relative a questo range di periodi sono in grado di fornire una stima indicativa della risposta potenziale di tali strutture. Si definisce quindi “Intensità dello spettro di Risposta” o Intensità di Housner (*response spectrum intensity*; Housner, 1959):

$$SI(\xi) = \int_{0.1}^{2.5} PSV(\xi, T) dT$$

che rappresenta l'area sottesa dallo spettro di risposta di pseudovelocità fra i periodi di 0.1 secondi e 2.5 secondi. Tale intensità spettrale può essere definita per qualunque valore di damping strutturale  $\xi$  e definisce in un unico parametro gli aspetti principali riguardanti il contenuto in frequenza e ampiezza di un terremoto. Si definisce “intensità dello spettro di velocità” (*velocity spectrum*

*intensity, PSV*) l'intensità spettrale calcolata per un valore di damping  $\xi$  pari al 5% -  $SI(5\%)$ . A titolo d'esempio, in figura 39 sono riportati gli spettri in pseudovelocità relativi al moto su roccia affiorante (curva blu) ed al moto sismico calcolato alla superficie della colonna stratigrafica in figura 36 (curva rossa) per uno smorzamento pari al 5%. La figura evidenzia un marcato effetto di amplificazione come indicato dalla differenza tra le aree sottese dagli spettri nell'intervallo 0.1 - 2.5s.



**Figura 39** Confronto tra lo spettro di pseudovelocità su roccia affiorante (curva blu) e quello alla superficie della colonna stratigrafica in figura 36 (curva rossa). Le aree rosse e blu indicano l'Intensità di Housner relativa agli spettri su soil e su roccia rispettivamente.

Per caratterizzare l'effetto causato da terremoti di maggiore energia (strong ground motion) su edifici aventi periodo fondamentale minore di 0.5 secondi, si introduce l'intensità dello spettro di accelerazione (*acceleration spectrum intensity*) definita come:

$$ASI(\xi) = \int_{0.1}^{0.5} S_a(\xi = 0.05, T) dT$$

Si definisce quindi “Fattore di Amplificazione”,  $F_a$ , il rapporto tra il valore del parametro  $SI$  calcolato alla superficie di una colonna stratigrafica (comprendente gli effetti di amplificazione locale) e quello su roccia affiorante. A seconda delle caratteristiche dei parametri di scuotimento e della tipologia delle strutture presenti all'interno dell'area comunale, è possibile variare l'intervallo di periodi (estremi di integrazione) entro cui calcolare  $SI$  utilizzando eventualmente anche gli spettri

di risposta in accelerazione ( $ASI$ ). **Tuttavia, data la sismicità e la sismotettonica dell'area, è apparso più indicato l'impiego del parametro  $F_{a,SI}$  (fattore di amplificazione stimato impiegando l'intensità spettrale). Tale fattore, in base ad una decisione assunta durante una riunione congiunta della Commissione per la Microzonazione e il Comitato Tecnico-Scientifico (CTS), è stato calcolato nell'intervallo spettrale 0.1-1.0s, rappresentativo dei periodi fondamentali della maggior parte degli edifici nelle aree considerate.**

Per ciascun punto misura considerato è quindi possibile associare un valore del parametro Fattore di Amplificazione,  $F_a$ , che, all'interno dell'intervallo di periodi considerato, dipende sia dalla frequenza di risonanza (o anche dalle armoniche superiori se presenti) che dal livello di amplificazione calcolato per il sito. Tale parametro può essere utilizzato per valutare il fattore correttivo da applicare al sito in esame in modo tale da considerare la risposta sismica locale rispetto al valore atteso su bedrock.

## CONCLUSIONI

Il percorso che ha portato alla predisposizione delle mappe di microzonazione sismica dei Comuni afferenti alla Provincia di Campobasso può essere sintetizzato come segue.

Sulla base di tutti i rilievi geologici e geofisici ed i sondaggi geofisici e geognostici è stato possibile definire dei litotipi o formazioni geologiche a comportamento sufficientemente omogeneo. Ciascuna formazione o litotipo è stata caratterizzata da un valore di  $V_{S,30}$  e successivamente associata ad una delle categorie di suolo di fondazione previsto dalla normativa sismica vigente.

Ai diversi suoli è stato associato un valore del coefficiente di sito,  $S$ , che, come definito dalla normativa, tiene conto del profilo stratigrafico del suolo di fondazione. Ciò ha portato alla elaborazione di mappe preliminari di microzonazione, basate solo su parametri geologico-geotecnici e sulle informazioni relative alla stabilità dei versanti e alle caratteristiche topografiche desunte dalle mappe geomorfologiche fornite dai professionisti e validate dall'Università del Molise.

Per ogni sondaggio in cui sono state effettuate prove Down-hole e per i siti in cui sono stati eseguiti profili sismici 2D, talora utilizzando anche le indagini basate sulla registrazione di microtremori, si è proceduto ad una modellazione 1D delle colonne stratigrafiche allo scopo di determinare le funzioni di trasferimento e le frequenze proprie del terreno. In generale non sono state fatte modellazioni quando il substrato roccioso risultava a profondità minore di 5m.

Dal rapporto tra gli spettri ottenuti (suolo/bedrock) è stato valutato il fattore di amplificazione  $F_a$ . Tale fattore è stato valutato per la banda spettrale: 0.1-1.0s. Questa banda si riferisce prevalentemente alle componenti ad alta frequenza contenute nello spettro e pertanto risulta legata a stratificazioni molto superficiali. I valori del fattore di amplificazione così calcolati sono stati confrontati con quelli derivati (coefficiente  $S$ ) da informazioni geologiche, geomorfologiche, litotecniche e geofisiche e valutati criticamente per ogni singolo sondaggio. Laddove possibile, i valori delle frequenze fondamentali ottenute dalle funzioni di trasferimento sono stati confrontati con quelli desunti dai rapporti H/V ottenuti mediante analisi Nakamura. In alcuni casi i risultati di tali analisi sperimentali hanno consentito di trarre utili indicazioni anche sugli spessori delle coltri superficiali.

Una volta calcolati i valori di  $F_a$  per ciascun sito, in base alle informazioni acquisite da studi geologici e geomorfologici, questi hanno contribuito a definire i valori definitivi del parametro  $S$  utilizzati per la redazione delle mappe di microzonazione.

## APPENDICE

A seguito dei risultati ottenuti dalle analisi numeriche per la maggior parte dei siti nei Comuni della Provincia di Cambobasso e con riferimento alla relazione “Considerazioni Generali e Metodologiche Propedeutiche agli Studi di Microzonazione Sismica” redatta presso il Dip.Te.Ris. (Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle sue Risorse – Università di Genova) nel Febbraio 2006 nell’ambito della microzonazione dei Comuni del “cratere” (Bonefro, Casacalenda, Castellino del Biferno, Collotorto, Larino, Montelongo, Montorio nei Frentani, Morrone del Sannio, Provvidenti, Rotello, Santa Croce di Magliano, Ururi) e approvata dalla Commissione per la Microzonazione Sismica dei Comuni della Provincia di Campobasso, anche per i restanti Comuni si può considerare valida la seguente classificazione dei terreni in funzione del parametro  $V_{S,30}$  (velocità media delle onde di taglio entro i primi 30m di terreno):

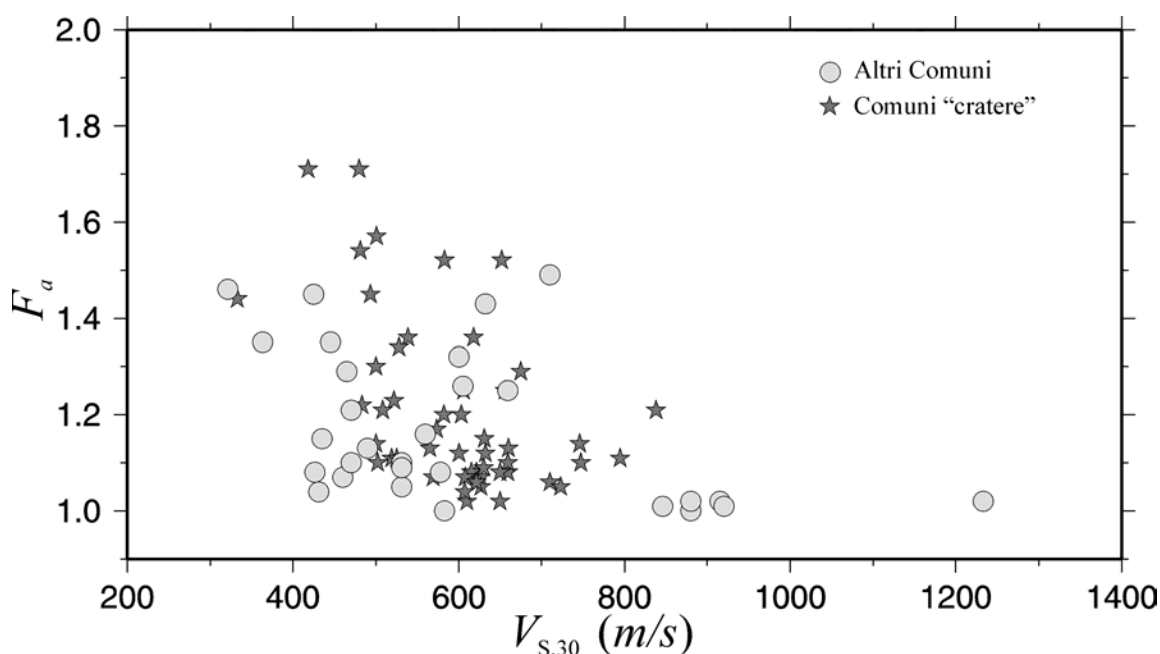
Suolo A:  $V_{S,30} > 800\text{m/s}$ ; coefficiente di sito  $S = 1.0$ ;

Suolo B1:  $600\text{m/s} < V_{S,30} < 800\text{m/s}$ ; coefficiente di sito  $S = 1.15$ ;

Suolo B2:  $360\text{m/s} < V_{S,30} < 600\text{m/s}$ ; coefficiente di sito  $S = 1.25$ ;

Suolo C:  $180\text{m/s} < V_{S,30} < 380\text{m/s}$ ; coefficiente di sito  $S = 1.40$ ;

La risposta sismica di un suolo tipo C può eventualmente essere descritta attraverso lo spettro di risposta corrispondente a terreni di tipo D definito in “Norme tecniche per le costruzioni” (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, D.M. 14 Settembre 2005).



**Figura A1** Relazione tra  $V_{S,30}$  e  $F_a$ .



La distinzione tra terreni di tipo B1 e B2 trova ulteriore riscontro nel grafico in Figura A1 che mostra la relazione empirica tra  $V_{S,30}$  e fattore di amplificazione ( $F_a$ ). I dati riportati in figura si riferiscono ai fattori di amplificazione calcolati per i Comuni del “cratere” e per quelli di Baranello, Cercemaggiore, Cercepliccola, Colle d’Anchise, San Giuliano del Sannio, Spinete e Vinchiatturo. La figura mostra che per valori di  $V_{S,30}$  compresi tra 600m/s e 800m/s il fattore di amplificazione assume valori generalmente inferiori a 1.20. Di contro, per  $360\text{m/s} < V_{S,30} < 600\text{m/s}$  risulta  $F_a > 1.20$ .

## BIBLIOGRAFIA

Ambraseys N. N., Simpson K. A., Bommer J. J.: 1996, Prediction of horizontal response spectra in Europe, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 25, 371-400.

Bommer J. J., Douglas J. and Strasser F. O.: 2003, Style-of-faulting in ground motion prediction equations, *Bull. Earth. Eng.* 1, 171-203.

Camassi R., Stucchi M.: 1997, NT4.1.1 Catalogo parametrico dei terremoti di area italiana al di sopra della soglia di danno, Internet web site: <http://emidius.mi.ingv.it/NT>.

Cornell C. A.: 1968, Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seis. Soc. Am.* 58, 1583-1606.

Crespellani T., Ciulli B., Madiati C., Vannucchi G.: 2000, Indagini geotecniche in sito e in laboratorio per la caratterizzazione meccanica in campo statico e dinamico di alcuni terreni di Fabriano. In *La Microzonazione Sismica di Fabriano*, a cura di Marcellini A. e Tiberi P.

Deliberazione della Giunta Regionale (Regione Molise) n. 1171: 2 agosto 2006, Riclassificazione sismica del territorio regionale – proposta di aggiornamento dell’elenco delle zone sismiche – Art. 3 comma 1 L.R. n.13/2004.

EC8-1 “Design of Structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings” Pr-EN 1998-1. Final Draft. December 2003.

Gruppo di lavoro CPTI: 1999, Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 1999. ING, GNDT, SGA, SSN, Bologna. <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI99/>.

Gruppo di lavoro CPTI: 2004, Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04). INGV, Bologna. <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI/>.

Gruppo di lavoro MPS: 2004: Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall’Ordinanza PCM del 20 marzo 2003, Rapporto conclusivo per il dipartimento di Protezione Civile, INGV, Milano – Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 appendici, Internet web site: [http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/rapporto\\_conclusivo](http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/rapporto_conclusivo).

Gutenberg B. and Richter C. R.: 1944, Frequency of earthquakes in California, *Bull. Seis. Soc. Am.* 34, 185-188.

Housner G. W.: 1959, Behaviour of structures during earthquakes, *J. Engineering Mechanics Division* 85, ASCE, No EM4, pp. 109-129.

Idriss I. M. and Sun, J. I. (1992) “User’s Manual for SHAKE91,” Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil Engineering, University of California, Davis.

Kramer S. L.: 1996, *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice-Hall, New Jersey, 106-139.

McGuire R. K. and Arabasz W. J.: 1990, An introduction to probabilistic seismic hazard analysis, In: Ward S. H. (eds), *Geotechnical and environmental geophysics* 1, 333-352.

Meletti C., Patacca E., Scandone P.: 2000, Construction of a seismotectonic model: the case of Italy, *Pure Appl. Geophys* 157, 11-35.

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti: 2005, Norme tecniche per le costruzioni, D.M. 14 Settembre 2005, Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale, 23 Settembre 2005, Serie generale - n. 222. Internet web site: [http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/ntc\\_140905\\_1.pdf](http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/ntc_140905_1.pdf).

Nakamura Y.: 1989, A method for dynamic characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface. *Quarterly Rept. RTRI, Jpn.* 30, pg 25-33.

Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 Marzo 2003. “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica”. GU n. 72 del 8-5-2003.

Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3316 del 2 Ottobre 2003. “Modifiche ed integrazioni all’ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003”. GU n. 236 del 10-10-2003.

Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3431 del 3 Maggio 2005. “Ulteriori Modifiche ed integrazioni all’ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003”. GU n. 236 del 10-05-2005.

Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3519 del 28 Aprile 2006. “Criteri generali per l’individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l’aggiornamento degli elenchi delle medesime zone”. GU n. 108 del 11-05-2006.

Reiter, L.: 1991, *Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insights*, Columbia University Press, New York

Sabetta F. and Pugliese A.: 1996, Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions, *Bull. Seism. Soc. Am.* 2, 337-352.

Scandone P., Patacca E., Meletti C., Bellatalla M., Perilli N., Santini U., (1990). “Struttura geologica, evoluzione cinematica e schema sismotettonico della penisola italiana”. *Atti del Convegno Annuale del Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti*, vol.1, p. 119-135.

Schnabel P. B., Lysmer J., and Seed H. B. (1972) “SHAKE: A Computer Program for earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites”, Report No. UCB/EERC-72/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December, 102p.

Seed H. B., Wong R. T., Idriss I. M. and Tokimatsu K.: 1986, Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 112, 1016-1032.



Seed H. B. e Idriss I.: 1970, Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses, Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Servizio Sismico Nazionale: 2003, Microzonazione sismica di S. Giuliano.

Sun J. I., Goleorkhi R. and Seed H. B.: 1988, Dynamic moduli and damping ratios for cohesive soils, Report No. EERC 88-15, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Weichert D. H.: 1980, Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes, Bull. Seis. Soc. Am. 70, 1337-1346.