

## MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO 3 DI UN COMUNE DELLA DAUNIA: ANALISI PRELIMINARI

Gaetano Falcone, Angelo Amorosi

*Politecnico di Bari*

[gaetano.falcone@poliba.it](mailto:gaetano.falcone@poliba.it), [angelo.amorosi@poliba.it](mailto:angelo.amorosi@poliba.it)

Daniela Boldini

*Università di Bologna*

[daniela.boldini@unibo.it](mailto:daniela.boldini@unibo.it)

### Sommario

Nella presente nota sono illustrati i risultati di analisi preliminari svolte nell'ambito di uno studio di microzonazione sismica di terzo livello del comune di Bovino (FG), finalizzato alla valutazione della pericolosità sismica dell'area attraverso il riconoscimento di aree sismicamente omogenee. La redazione di tale studio ha richiesto una descrizione sufficientemente dettagliata sia del modello geologico sia del modello geotecnico, lo studio di pericolosità di base per l'area in esame e la quantificazione degli effetti indotti dalle condizioni locali sulla risposta sismica. Nello specifico, nella nota sono riportati i risultati di analisi monodimensionali (1D) e bidimensionali (2D) relative al suddetto abitato della Daunia, eseguite secondo l'approccio lineare equivalente implementato nel codice agli elementi finiti QUAKE/W.

### 1. Introduzione al caso di studio

La redazione di studi di dettaglio della microzonazione sismica (MS) è stata di recente sollecitata dalla necessità, da parte delle competenti amministrazioni pubbliche, di disporre di strumenti efficaci finalizzati alla mitigazione del rischio sismico.

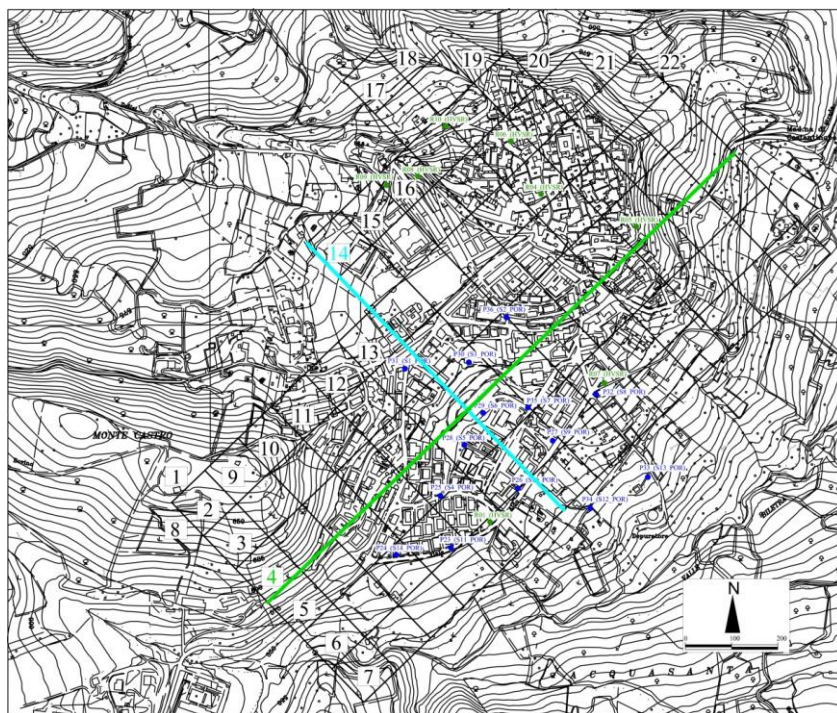
Come riportato al § 1.1 del documento *Indirizzi e criteri* (Gruppo di Lavoro MS, 2008), per microzonazione sismica si intende la “valutazione della pericolosità sismica locale attraverso l'individuazione di zone del territorio caratterizzate da comportamento sismico omogeneo”. Secondo lo stesso documento, gli studi di MS possono essere effettuati con riferimento a tre livelli di approfondimento, in ragione del dettaglio richiesto dalle successive fasi di pianificazione territoriale e di quella dell'emergenza. In particolare, le analisi di maggiore dettaglio, che caratterizzano il livello 3, devono essere basate su una descrizione sufficientemente dettagliata sia del modello geologico sia di quello geotecnico, devono inoltre includere lo studio di pericolosità di base per l'area in esame e consistono nella quantificazione degli effetti indotti dalle condizioni locali sulla risposta sismica, da determinarsi mediante analisi monodimensionali (1D) o multidimensionali (2D o 3D).

In questa nota sono riportate le analisi preliminari eseguite nell'ambito dello studio di MS di livello 3 del comune di Bovino (FG).

L'attività di studio del caso in esame ha incluso: l'individuazione dei segnali sismici costituenti l'input sismico di riferimento, la sintesi degli aspetti relativi alla morfologia superficiale, l'analisi di dettaglio di 12 sondaggi per la definizione del modello geotecnico di sottosuolo (con particolare enfasi alla individuazione della formazione rocciosa di base da adottarsi quale *bedrock* nelle analisi), la sintesi dei risultati delle 32 prove in laboratorio eseguite su campioni indisturbati e delle 9 prove *down-hole* eseguite nell'area comunale al fine di caratterizzare il comportamento meccanico dei terreni in condizioni statiche e dinamiche.

Le analisi hanno riguardato un'area complessiva pari a circa  $1.1 \text{ km}^2$ , opportunamente suddivisa mediante 22 sezioni le cui tracce sono riportate in Figura 1.1. In particolare, dalla figura si evince che le sezioni dalla 1 alla 7 sono orientate SO-NE, mentre quelle dalla 8 alla 22 NO-SE. Per ogni sezione analizzata mediante analisi numeriche, condotte sia in condizioni 1D sia 2D, sono stati determinati gli accelerogrammi in superficie ogni 50 m, così da ottenere un quadro di notevole dettaglio della risposta sismica locale. Nel presente documento, per ovvi motivi di brevità, sono illustrati a titolo di esempio i soli risultati relativi alle sezioni 4 e 14, considerati rappresentativi della risposta di insieme del sito in esame.

Particolare enfasi è stata riposta nella fase di scelta dei fattori di amplificazione appropriati a descrivere i risultati delle analisi in termini di modifiche che il segnale di input subisce per effetto delle condizioni stratigrafiche e topografiche locali.



*Figura 1.1. Tracce delle sezioni studiate, Bovino (FG)*

### *1.1 Moto sismico di riferimento*

Il moto sismico di riferimento può essere individuato secondo diversi approcci (§ 3.1.8, *Indirizzi e criteri*) di seguito sintetizzati: calcolo del moto con criteri sismologici (metodo stocastico), calcolo del moto con analisi di pericolosità di base (metodo probabilistico-statistico), calcolo del moto attraverso lo studio di accelerogrammi reali registrati (metodo deterministico). Per questo studio il moto di riferimento è stato determinato adottando il metodo probabilistico-statistico. Assunto un periodo di ritorno di 475 anni (50esimo percentile, vita di riferimento di 50 anni e probabilità di superamento del 10%), è stato possibile individuare lo spettro di riferimento (NTC, 2008) per il sito in esame. Dalla analisi di disaggregazione INGV (<http://esse1-gis.mi.ingv.it/>), è stata individuata la coppia magnitudo ( $M$ ) - distanza epicentrale ( $R$ ) necessaria alla selezione di 7 segnali spettrocompatibili. Tali segnali sono stati estratti tra quelli catalogati dallo *European Strong-motion database*, adottando il codice Rexel (Iervolino et al., 2009). La spettrocompatibilità è stata imposta assumendo una tolleranza della media delle ordinate spettrali del 10% all'interno dell'intervallo  $0.1 < T < 0.5 \text{ s}$ , considerato rappresentativo dei periodi propri di vibrazione delle tipologie costruttive maggiormente diffuse nell'area oggetto di studio.

In Tabella 1.1 sono riassunte le caratteristiche dei 7 accelerogrammi spettrocompatibili selezionati.

Segnale	Earthquake ID	Station ID	Earthquake Name	Date	Mw	Epicentral Distance (km)	PGA_X (m/s <sup>2</sup> )	PGA_Y (m/s <sup>2</sup> )	Site class	Fattore di scala	Componente Spettro-compatibile
1	1635	ST2486	South Iceland	17/06/2000	6.5	5	3.12	3.31	A	0.71345	x
2	350	ST236	Umbria Marche	03/10/1997	5.3	5	1.53	1.84	A	1.21030	y
3	80	ST45	Calabria	11/03/1978	5.2	10	0.74	0.76	A	2.92070	y
4	153	ST120	Campano Lucano	16/01/1981	5.2	8	0.63	0.63	A	3.54240	y
5	175	ST140	Lazio Abruzzo	07/05/1984	5.9	5	0.99	1.08	A	2.05910	y
6	2142	ST2558	South Iceland	21/06/2000	6.4	5	7.29	8.22	A	0.27066	y
7	1635	ST2486	South Iceland	17/06/2000	6.5	5	3.12	3.31	A	0.67180	y

Tabella 1.1. Caratteristiche dei 7 accelerogrammi spetrocompatibili selezionati (Iervolino et al., 2009)

## 1.2 Modello geotecnico

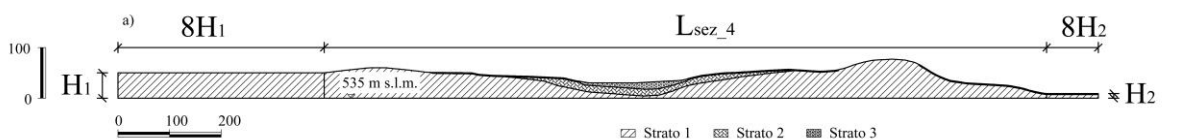
Il modello geologico del sito in esame, semplificato in funzione dello scopo del presente studio, è stato sviluppato a partire da quello già adottato in passato nelle analisi di MS di livello 1, integrandolo opportunamente con i risultati di tutte le indagini geognostiche disponibili. La formulazione del modello geotecnico di sottosuolo, coerentemente con le sue finalità, ha portato alla identificazione sintetica di tre unità stratigrafiche, le cui proprietà sono riportate in Tabella 1.2.

Strato	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	$V_p$ (m/s)	IP (%)
1	18	1200	2078	/
2	18	800	1386	22
3	18	200	346	22

Tabella 1.2. Proprietà fisiche e meccaniche medie degli strati

L'unità 1 comprende i materiali noti come Flysch di Faeto, costituito da alternanze di strati argillosi e lapidei, e Sintema di Bovino, costituito da una successione sabbioso-conglomeratica. L'unità 2 è il prodotto dell'alterazione del sottostante Flysch di Faeto. L'unità 3 è costituita da limo e argilla di media consistenza, a luoghi con sostanza organica, ed include porzioni di terreno vegetale ove presente.

In Figura 1.2 sono riportate le sezioni 4 e 14. Vista la complessa topografia e l'articolata disposizione geometrica degli strati nel sottosuolo, è parso opportuno studiare la risposta sismica locale (RSL) del



sito in esame attraverso una modellazione bidimensionale. Peraltro, è stata effettuata anche una serie di analisi monodimensionali i cui risultati, posti a confronto con quelli 2D, hanno consentito di isolare e quantificare gli effetti topografici.

Le analisi numeriche, di tipo visco-elastico lineare equivalente, hanno consentito di tener conto della natura non lineare del comportamento meccanico dei terreni in esame. Al riguardo, in assenza di specifiche prove di laboratorio per la determinazione delle curve  $G(\gamma)/G_0$  e  $D(\gamma)$ , per lo strato 1 è stato assunto un comportamento lineare - trattandosi di formazione rocciosa - mentre, per gli strati 2 e 3, sono state assunte a riferimento le curve riportate in Figura 1.3, selezionate in funzione dell'indice di plasticità secondo Darendeli (2001).

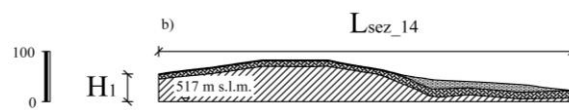


Figura 1.2. a) Sezione 4 e b) Sezione 14, Bovino (FG)

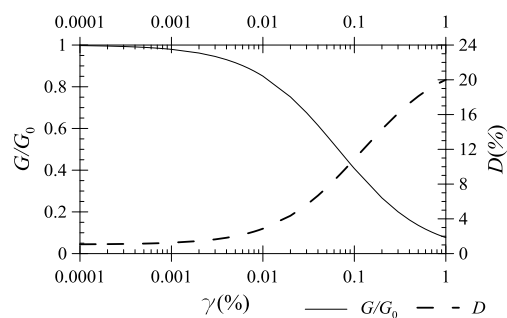


Figura 1.3. Curve  $G(\gamma)/G_0$  e  $D(\gamma)$  per gli strati 2 e 3.

### 1.3 Fattori di amplificazione

L'amplificazione locale, stratigrafica e topografica, è stata rappresentata attraverso l'adozione di tre fattori di amplificazione definiti secondo le seguenti espressioni:

$$FH_{0.1-0.5} = \int_{0.1}^{0.5} PSV_o dT / \int_{0.1}^{0.5} PSV_i dT \quad FH_{0.5-1} = \int_{0.5}^1 PSV_o dT / \int_{0.5}^1 PSV_i dT \quad F_{PGA} = PGA_o / PGA_i \quad (1)$$

dove:  $PGA$  è l'accelerazione di picco al suolo,  $PSV$  è la pseudo-velocità spettrale riferita ad uno smorzamento convenzionale del 5% e  $T$  il periodo. I pedici  $i$  ed  $o$  si riferiscono rispettivamente al segnale di *input*, registrato all'affioramento della formazione rocciosa (*outcrop*), ed al segnale di *output* determinato in superficie lungo le sezioni esaminate. I fattori  $F_{PGA}$ ,  $FH_{0.1-0.5}$  ed  $FH_{0.5-1}$  sono stati selezionati così da poter rappresentare gli effetti di amplificazione, rispettivamente, alle alte, medie e basse frequenze dell'intervallo preso in esame.

Il segnale di *output* è stato determinato per ognuno dei sette segnali di *input*. Il risultato finale per il singolo fattore di amplificazione è stato ottenuto per ciascun punto selezionato come valore medio dei sette risultati così determinati.

## 2. Simulazioni numeriche

Sono state eseguite analisi numeriche lineari equivalenti nel dominio del tempo, sia 1D sia 2D, con il codice di calcolo agli Elementi Finiti QUAKE/W 2004 (Krahn, 2004).

È importante ricordare che lo studio della risposta sismica locale attraverso approcci numerici agli elementi finiti richiede particolare attenzione nella definizione di: condizioni al contorno, dimensioni del modello geometrico (*mesh*), tipologia e dimensione media degli elementi con i quali è discretizzata la *mesh*, passo temporale dell'analisi.

Nelle analisi in esame la condizione di vincolo assegnata ai nodi appartenenti ai bordi verticali della *mesh* equivale ad un carrello ad asse verticale, ovvero con spostamenti verticali impediti ( $u_y = 0$ ) ed orizzontali liberi ( $u_x = free$ ). Per la base è stata adottata la condizione di contorno assorbente (*compliant base*). A tale scopo, sono stati applicati smorzatori viscosi in direzione orizzontale e verticale di caratteristiche rispettivamente:

$$D_x = \rho_{bedrock} \cdot V_{S\_bedrock} \cdot L_{node} \quad D_y = \rho_{bedrock} \cdot V_{P\_bedrock} \cdot L_{node} \quad (2)$$

dove  $L_{node}$  è la distanza fra i nodi appartenenti alla base della *mesh*. Tale scelta è stata dettata dalla necessità di limitare l'estensione del modello ad una sola porzione della formazione di base, permettendo al contempo di applicare ad ogni punto dello stesso contorno inferiore il segnale, indipendentemente dalla profondità, in termini di sforzo di taglio equivalente variabile nel tempo, determinato secondo la:

$$\tau(t) = \rho_{bedrock} \cdot V_{S\_bedrock} \cdot v(t, outcrop) \quad (3)$$

essendo  $v(t, outcrop)$  la storia temporale delle velocità ottenuta per integrazione del segnale registrato all'*outcrop*,  $\rho_{bedrock}$  e  $V_{S\_bedrock}$  proprie dello strato di base 1.

Al fine di ridurre gli effetti di bordo, la larghezza delle *mesh* adottate in QUAKE/W 2004 è stata incrementata di una lunghezza pari ad  $8(H_1 + H_2)$  rispetto alla dimensione  $L_{sez4}$  della sezione considerata, essendo  $H_1$  ed  $H_2$  gli spessori del terreno alle estremità della stessa (Figura 1.2a).

Sono state generate *mesh* non strutturate composte da elementi triangolari la cui dimensione massima è stata determinata secondo l'espressione (Kuhlemeyer & Lysmer, 1973):

$$h_{max} \leq V_s / 6 \div 8 \cdot f_{max} \quad (4)$$

dove  $V_s$  è la velocità di propagazione delle onde di taglio nel materiale e  $f_{max}$  è la massima frequenza di interesse dei segnali considerati. Ai segnali di *input* è stato applicato un filtro passa-basso con frequenza di *cut-off* pari a 10 Hz. Circa la discretizzazione temporale, per le simulazioni numeriche è stato assunto un passo di analisi pari ad 1/10 del passo di campionamento del segnale. Infine, considerato che sono state eseguite analisi lineari equivalenti, il valore del rapporto  $R_y$  fra la

deformazione di taglio ( $\gamma_{eff}$ ), appropriata all'evento sismico, ed il valore massimo ( $\gamma_{max}$ ), registrato durante l'evento sismico, è stato determinato secondo l'espressione (Schnabel et al., 1972):

$$R_\gamma = \gamma_{eff} / \gamma_{max} = (M - 1) / 10 \quad (5)$$

essendo  $M$  la magnitudo momento dell'evento stesso.

Per ogni sezione di analisi di Figura 1.1 sono state eseguite sette analisi di RSL con riferimento ad ognuno dei segnali di *input*. In seguito, per ciascuna sezione, sono stati calcolati per ciascuno dei tre fattori di amplificazione i profili dei risultati medi delle sette analisi.

## 2.1 Fattori di amplificazione lungo le sezioni 4 e 14

In Figura 2.1 sono confrontati i profili dei valori medi (2D vs 1D) dei tre fattori di amplificazione lungo le sezioni 4 e 14.

Nella stessa figura sono evidenti gli effetti di valle e topografici:

- in corrispondenza del centro della valle ( $x = 650$  m) tutti e tre gli indicatori adottati evidenziano l'effetto di amplificazione cosiddetto di valle. I valori di  $FH_{0.1-0.5}$  ed  $F_{PGA}$  determinati da analisi 1D risultano inferiori rispetto a quelli ottenuti da analisi 2D, rispettivamente, del 27% e del 17%;
- le analisi condotte con schemi 1D non sono in grado di cogliere effetti di amplificazione legati alla topografia dell'area in esame. Ad esempio, per le ascisse comprese tra 1000 e 1200 m di Figura 2.1a, pur essendo in presenza di una zona di affioramento della formazione rocciosa, il segnale previsto dalle analisi 2D in superficie risulta amplificato rispetto a quello di *input* in ragione dell'effetto della topografia. Tale aspetto è del tutto assente nelle analisi 1D, per ovvi motivi legati all'assunzione implicita di simmetria che caratterizza le colonne esaminate.

E' interessante osservare come l'andamento dei differenti fattori di amplificazione adottati, ancorché non sostanzialmente dissimile, mostri delle differenze in relazione al campo di periodi cui si riferisce. In particolare, confrontando i profili  $FH_{0.1-0.5}$  ed  $FH_{0.5-1}$  è possibile desumere in dettaglio quali porzioni del sito studiato diano luogo ad effetti di amplificazione più rilevanti per specifiche tipologie strutturali, caratterizzate da campi di periodi differenti ( $0.1 < T < 0.5$  s o  $0.5 < T < 1$  s). Tali risultati possono avere un impatto non trascurabile in fase di pianificazione urbanistica con riferimento a strutture da realizzarsi, e nella previsione di scenari di rischio specifici per edifici già esistenti nell'area in esame.

Considerazioni analoghe a quelle di cui sopra possono essere estese anche alla sezione 14 di Figura 2.1b. In questo caso non è però evidente la presenza di una sola zona "di valle", per cui la risposta risulta più articolata rispetto a quella della Sezione 4: per ascisse comprese tra 500 ed 800 m, in base ai risultati delle analisi 2D, sono riconoscibili due picchi dei fattori di amplificazione.

E' il caso di osservare che i tre fattori di amplificazione, determinati adottando un approccio 2D, assumono valori medi differenti con riferimento alle due sezioni studiate nel relativo punto di incontro,  $x_{sezione\ 4} = 600$  m e  $x_{sezione\ 14} = 500$  m (Tabella 2.1). Questo risultato, che evidenzia la necessità di elaborare i risultati ottenuti in questa fase di attività in modo spaziale per poter pervenire ad una mappa di rappresentazione degli stessi, nel contempo giustifica gli sviluppi futuri della ricerca, che sarà volta ad approcciare il medesimo problema attraverso analisi tri-dimensionali.

	Sez_4	Sez_14	Sez_4	Sez_14	Sez_4	Sez_14
	$FH_{0.1-0.5}$	$FH_{0.1-0.5}$	$FH_{0.5-1}$	$FH_{0.5-1}$	$F_{PGA}$	$F_{PGA}$
2D	1.60	2.07	1.98	1.62	2.11	1.58
1D	1.68	1.69	2.15	2.13	2.28	2.26

Tabella 2.1. Valori medi dei fattori di amplificazione nel punto di incontro tra le sezioni 4 e 14



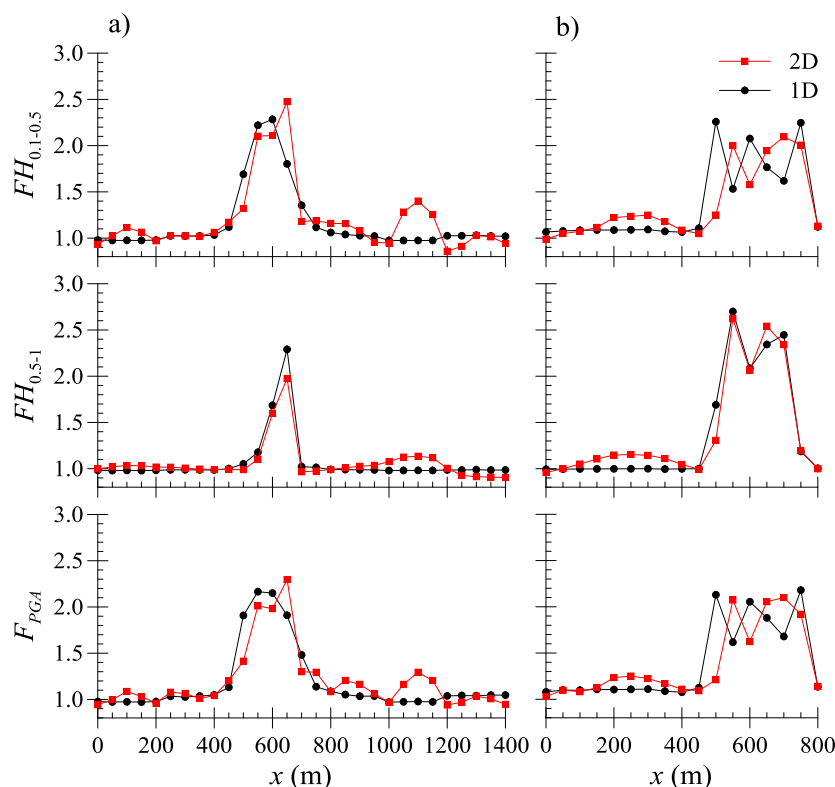


Figura 2.1 Confronto, 2D vs 1D, tra i profili dei valori medi dei fattori di amplificazione lungo le sezioni 4 e 14, Bovino (FG)

### 3 Conclusioni

Nella presente nota sono illustrati gli aspetti salienti di una serie di analisi preliminari finalizzate allo studio della microzonazione sismica di livello 3 per il comune di Bovino (FG).

Il confronto tra i profili dei fattori di amplificazione adottati per rappresentare i risultati di analisi numeriche 1D e 2D ha evidenziato il ruolo non trascurabile degli effetti topografici che, unitamente a quelli stratigrafici, caratterizzano fortemente il sito in esame in ragione della sua orografia e della complessa disposizione dei tre principali strati che ne costituiscono il sottosuolo. In particolare solo l'approccio 2D ha permesso di descrivere i così detti effetti "di valle" (amplificazione al centro della valle) e "topografici" (amplificazione al vertice del rilievo).

Infine, la differente risposta ottenuta dalle analisi 2D nel punto di incontro tra le due sezioni studiate evidenzia la necessità di approcciare il medesimo problema attraverso analisi tridimensionali.

### Bibliografia

- Gruppo di Lavoro MS. (2008). *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*. Roma: Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome - Dipartimento della Protezione Civile.
- Iervolino, I., Galasso, C., & Cosenza, E. (2009). "REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8(2), 339–362.
- Krahn, J. (2004). *Dynamic modeling with QUAKE/W: an engineering methodology*. Calgary, Alberta, Canada: GEO-SLOPE International Ltd.
- Kuhlemeyer, R. L., & Lysmer, J. (1973). "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*", 99(5), 421–427.
- NTC. "Norme Tecniche per le Costruzioni" (2008). Italia: D.M. 14 Gennaio 2008.
- Schnabel, P. B., Lysmer, J., & Seed, H. B. (1972). "SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites", University of California, Berkeley.