RISPOSTA SISMICA LOCALE 1D E 2D PER LA MICROZONAZIONE DI 3°LIVELLO DI ALCUNE AREE PILOTA DELL'AQUILANO

L. Macerola[1], F. Durante[1], G. Milana[2], M. Nocentini[3], S. Santangelo[4], M. Tallini[1]
[1] *Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile - Architettura e Ambientale, Università degli Studi dell'Aquila, Italia*
[2] *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma, Italia*
[3] *Dipartimento di Scienze Geologiche, Università degli Studi di Roma Tre, Roma, Italia*
[4] *Stacec s.r.l., Bovolino (RC), Italia*

Introduzione. Si espongono i risultati preliminari della risposta sismica locale tramite modellazione numerica 1D e 2D, propedeutici ad uno studio di 3° livello di microzonazione delle aree pilota di Sassa e Preturo del Comune dell'Aquila. L'analisi è stata eseguita su una sezione esemplificativa della geologia dell'area in esame (la sezione B-B' della carta geologico-tecnica della zona Preturo: AA.VV., 2014) utilizzando le metodiche riportate in Gruppo di lavoro MS (2008) e in Gruppo di Lavoro MS–AQ (2010). I risultati preliminari della risposta sismica locale hanno permesso di evidenziare dei probabili effetti di valle riscontrati sui bordi della sezione (valori doppi in pseudo-accelerazione fra analisi 1D e 2D) e assenza di effetti 2D al centro della sezione.

Input sismico. L' input sismico utilizzato nelle analisi numeriche comprende i quattro accelerogrammi al bedrock ricavati dallo studio di microzonazione sismica dell'area aquilana (Gruppo di Lavoro MS–AQ, 2010) (Fig. 1): un accelerogramma compatibile con lo spettro a pericolosità uniforme (UHS) della normativa (NTC-08); tre accelerogrammi compatibili con lo spettro deterministico ottenuto dalla relazione di attenuazione di Sabetta e Pugliese (1996) per una coppia di magnitudo e distanza (Mw = 6.7, Repi = 10 km) ricavata dalla analisi di

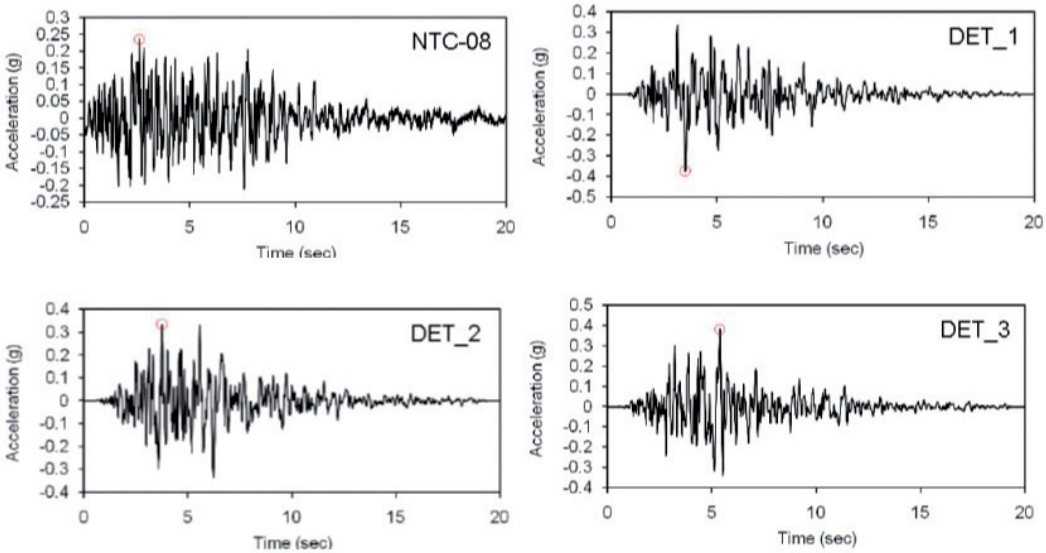

Fig. 1 – DET_1, DET_2, DET_3 e NTC, set di quattro diversi accelerogrammi di input sismico utilizzati nelle analisi numeriche (Gruppo di Lavoro MS–AQ, 2010).

disaggregazione (DET_1, DET_2 e DET_3). Si è deciso di confrontare la media degli output (pseudo-accelerazione, pseudo-velocita e spostamenti) basata sugli accelerogrammi DET_1, DET_2 e DET_3 con l'output calcolato con l'accelerogramma NTC. Sia nell'analisi 1D e 2D, il confronto mette in evidenza come gli spettri di risposta derivanti da input di normativa, sottostimano rispetto agli accelerogrammi di input derivanti da dati di disaggregazione caratteristici del sito.

I codici di calcolo 1D e 2D. I codici possono essere suddivisi principalmente in funzione della geometria del modello e del tipo di analisi, lineare equivalente o non lineare, in tensioni totali o tensioni efficaci. L'analisi lineare equivalente è condotta in tensioni totali. Essa permette una trattazione semplificata del problema e allo stesso tempo di tenere in conto aspetti complessi quali l'eterogeneità del deposito e la non linearità del legame sforzi deformazione del terreno.

Di contro l'analisi lineare equivalente non consente di:

- valutare gli eccessi di pressione interstiziale indotti;
- tenere conto del decadimento delle caratteristiche di rigidezza dei terreni conseguente al processo di accumulo delle pressioni interstiziali;
- effettuare il calcolo delle deformazioni permanenti.

Le analisi non lineari possono essere condotte in tensioni totali ed efficaci. L'adozione di un modello non lineare in tensioni efficaci consente di tenere conto di importanti aspetti riguardanti il comportamento ciclico del terreno quali:

- la generazione degli eccessi di pressione interstiziale, particolarmente rilevante se l'analisi della risposta locale è finalizzata alla stima del potenziale di liquefazione di un deposito;
- la ridistribuzione e l'eventuale dissipazione degli eccessi di pressione interstiziale durante e dopo il terremoto;
- il decadimento progressivo delle caratteristiche di rigidezza dei terreni;
- le deformazioni permanenti.

In generale l'analisi non lineare consente quindi una modellazione più accurata e aderente alla realtà del comportamento sforzi-deformazioni del terreno, rispetto ad un'analisi lineare equivalente. La scelta tra l'analisi lineare equivalente e quella non lineare deve essere adeguatamente ponderata in funzione dell'obiettivo dell'analisi e del costo necessario per determinare valori rappresentativi dei parametri di input richiesti dall'analisi. Il codici di calcolo

più frequentemente utilizzato per le analisi 1D è quello lineare equivalente SHAKE (Idriss e Sun, 1992). Il codice di calcolo più diffuso per lo studio della risposta locale bi-dimensionale è quello lineare equivalente QUAD4/QUAD4M (Idriss *et al*., 1973; Hudson *et al*., 1993). In generale i codici di calcolo forniscono:

- le storie temporali delle tensioni tangenziali, delle deformazioni tangenziali, delle accelerazioni ed i corrispondenti spettri di risposta di Fourier, in superficie e a profondità intermedie nel sottosuolo;
- l'andamento con la profondità dei valori massimi di accelerazione, tensione e deformazione di taglio.

I codici di calcolo utilizzati in questo studio sono per la modellazione 1D, EERA (Idriss e Sun, 1992), per quella 2D, LSR 2D della Stacec srl (http://www.stacec.com/).

Analisi 1D: il codice EERA. Il codice EERA elabora le analisi di calcolo in un semispazio che si riferisce ad un modello discreto a masse concentrate. In particolare, gli strati del deposito si schematizzano con una serie di masse concentrate in corrispondenza della superficie di separazione degli strati e collegati tra loro da molle e smorzatori viscosi. Il modello lineare visco-elastico fa riferimento al modello reologico di Kelvin-Voigt (molla e smorzatore viscoso in parallelo) nel quale si ipotizza che le onde di taglio si propagano con direzione verticale all'interno del deposito poggiante su bedrock. Nel modello lineare equivalente si ammette che il modulo di taglio G e il rapporto di smorzamento D siano funzione dell'ampiezza della deformazione di taglio γ. Nel programma di calcolo i moduli G e D si ottengono da iterazioni che sono funzione del livello di deformazione indotto in tutti gli strati; quindi non sono costanti ma variano fino a raggiungere un valore compatibile con il livello di deformazione indotto dal sisma. Il processo iterativo si interrompe nel momento in cui i valori di rigidezza e smorzamento calcolati sono compatibili con quelli indotti dalle deformazioni iniziali. In generale con otto iterazioni si ottiene una convergenza tra i valori calcolati e quelli iniziali. I risultati di un'analisi di amplificazione locale dipendono fortemente dall'uso che se ne intende fare. In particolare, se si sta effettuando una verifica dinamica della struttura, in campo non lineare, è necessario conoscere la funzione che rappresenta istante per istante il moto sismico presente al suolo, ossia la storia delle accelerazioni. Per esempio può essere utile l'accelerogramma in superficie, il suo spettro di Fourier o nel caso della progettazione i suoi spettri di risposta in accelerazione, velocità e/o spostamento in funzione di un valore prefissato di smorzamento critico. In generale da un'analisi di risposta sismica locale si ottengono:

- lo spettro di risposta in accelerazione, velocità e spostamento; parametro base della progettazione strutturale;
- la storia temporale delle accelerazioni in superficie; necessaria per una eventuale verifica dinamica di una struttura.

Analisi 2D: il codice LSR 2D. Il software LSR 2D (Local Seismic Response 2D) consente di effettuare un'analisi di risposta sismica locale con modellazione bidimensionale mediante un approccio agli elementi finiti, nel dominio del tempo, in tensioni totali, utilizzando un modello di sottosuolo alla Kelvin-Voigt simile come codice di calcolo al più noto QUAD 4M. Ma fra gli aspetti positivi si distingue per una consistente rapidità nell'elaborazione della mesh di calcolo utile in situazioni geologiche complesse come quelle della sezione in esame. Utilizzando un'analisi bidimensionale lineare equivalente a masse concentrate, il modello del sottosuolo viene discretizzato in una mesh di elementi di forma triangolare o, preferibilmente, quadrangolare, consentendo una efficace modellazione della variazione geometrica del contatto fra la copertura e il bedrock. La generazione della mesh è una delle fasi più delicate dell'analisi, dipendendo da essa sia l'accuratezza della soluzione e sia l'onere computazionale. In generale si può affermare che tanto più la mesh è fitta tanto più la soluzione è accurata e tanto maggiori sono il tempo e la memoria richiesta dall'elaborazione. L'utilizzo di una mesh eccessivamente grossolana si traduce in un filtraggio delle componenti di alta frequenza poiché le piccole lunghezze d'onda non possono essere adeguatamente modellate da nodi troppo distanti tra loro.

Viene perciò generalmente raccomandato di scegliere l'altezza h di ogni elemento in modo che risulti:

$$h \leq \left(\frac{1}{8} \div \frac{1}{5}\right) \frac{V_s}{f_{max}}$$

dove: h: passo della mesh; V_s: velocità di propagazione delle onde di taglio nel mezzo discretizzato; f_{max}: frequenza massima considerata nell'analisi (generalmente pari a 20-25 Hz).

Nel caso di studio la generazione della mesh è stata costruita con un approccio adattivo, in modo da preservare risorse di calcolo a favore dei punti di controllo identificati per l'ottenimento dei risultati di output (P34, P127, P159). Il passo mesh quindi passa da valori più elevanti partendo dal bedrock, pari a 4 metri, per poi attestarsi su valori inferiori, pari a un metro, in prossimità dei punti di controllo. L'equilibrio globale è espresso dal sistema di equazioni:

$$M\,\ddot{u} + C\,\dot{u} + K\,u = M\,\ddot{u}_b$$

dove: u è il vettore degli spostamenti nodali; M la matrice delle masse globale; K la matrice delle rigidezze globale; C la matrice di smorzamento globale; $\ddot{u}_b$ la storia temporale dell'accelerazione di input.

Le equazioni vengono risolte tramite integrazione diretta nel dominio del tempo con il metodo di Newmark ed in modo particolare con il metodo CAA (Constant Average Acceleration) che è stabile e non introduce alcun damping numerico. Il moto sismico di input $\ddot{ub}$ viene applicato simultaneamente a tutti i nodi della base del bedrock sotto forma di onde di taglio e/o onde di compressione con direzione di propagazione verticale.

In ogni problema di propagazione di onde sismiche, parte dell'energia si allontana indefinitamente dalla regione di interesse verso il semispazio circostante. L'estensione finita della zona discretizzata comporta necessariamente la presenza di confini che devono modellare il più accuratamente possibile questa aliquota di energia persa per radiazione. Questo è possibile attraverso l'applicazione di smorzatori viscosi anche ai lati del modello, simulando dunque le perdite per radiazione di energia appena evidenziate. Nel nostro modello questo accorgimento non è stato necessario poiché la sezione geologica B-B', oggetto di modellazione, presenta un chiusura totale su bedrock su entrambe le frontiere laterali (AA.VV., 2014) (Fig. 2). La non linearità del terreno viene tenuta in conto attraverso l'esecuzione di analisi lineari equivalenti. Le proprietà dissipative del terreno sono modellate attraverso la matrice di dissipazione C. Essa deriva dall'assemblaggio delle matrici di dissipazione dei singoli elementi calcolate secondo la formulazione di Rayleigh completa:

$$C_i = \alpha_{Ri} M_i + \beta_{Ri} K_i$$

dove α_{Ri} e β_{Ri} sono i coefficienti di Rayleigh ed Mi, Ci e Ki le matrici locali del singolo elemento.

L'adozione di una formulazione alla Rayleigh comporta uno smorzamento dipendente dalla frequenza che può condizionare in maniera sensibile i risultati di un'analisi numerica. Per minimizzare tale variazione per entrambi i codici di calcolo i coefficienti di Rayleigh vengono calcolati in funzione di due frequenze naturali dell'intero deposito, ωn e ωm:

$$\alpha Ri = \xi i \, \frac{2\,\omega m * \omega n}{\omega m + \omega n} \qquad \beta Ri = \xi i \frac{2}{\omega m + \omega n}$$

in cui: ξi è il rapporto di smorzamento viscoso dell'i-esimo elemento finito; $\omega m = \omega 1$ prima frequenza naturale di vibrazione del deposito di terreno; $\omega n = n\,\omega_1$ essendo n l'intero dispari che approssima per eccesso il rapporto tra la frequenza predominante dell'input sismico ω_{IN} e la frequenza ω_1.

Il software LSR 2D richiede in input, per ciascun materiale, i seguenti parametri:

- il peso dell'unità di volume, modulo di taglio e smorzamento a basse deformazioni, coefficiente di Poisson delle unità litotecniche;
- la curva di attenuazione con il livello di deformazione tangenziale del modulo di rigidezza, normalizzata rispetto al valore iniziale;
- la curva di variazione del rapporto di smorzamento con il livello di deformazione tangenziale;
- la costante α per il calcolo del valore caratteristico della deformazione tangenziale a partire dal valore massimo di $\gamma(t)$ (in genere pari a 0.65).

In uscita il codice fornisce:
- le accelerazioni massime in tutti i nodi della mesh;
- gli sforzi e le deformazioni tangenziali massime in ciascun elemento;
- la storia temporale dell'accelerazione nei nodi selezionati (componenti verticali e orizzontali).

Risultati. I risultati presentati si riferiscono a tre verticali sulla sezione BB' (Preturo-Macchione) identificati dalle sigle P34, P127, P159 (Fig. 2).

Il punto P34 è stato posto in vicinanza del bordo ovest della Sezione B-B'. La stratigrafia correlata è congruente alla MOPS 2024 (Fig. 2), caratterizzata dalla presenza di coperture appartenenti ai depositi di COL (E7), FAL (ZZ), ANT (G) al di sopra di serie composte dalle stesse associazioni litotecniche delle MOPS precedentemente descritte (AA.VV, 2014; Regione Abruzzo, 2012).

Il punto P127 è posto nel mezzo della valle, rappresenta la condizione più prossima alla modellazione puramente monodimensionale. La stratigrafia corrisponde a quella della MOPS 2026 (Fig. 2), che è simile a quella della MOPS 2024, variando però spessori e valori medi delle Vs (AA.VV, 2014; Regione Abruzzo, 2012).

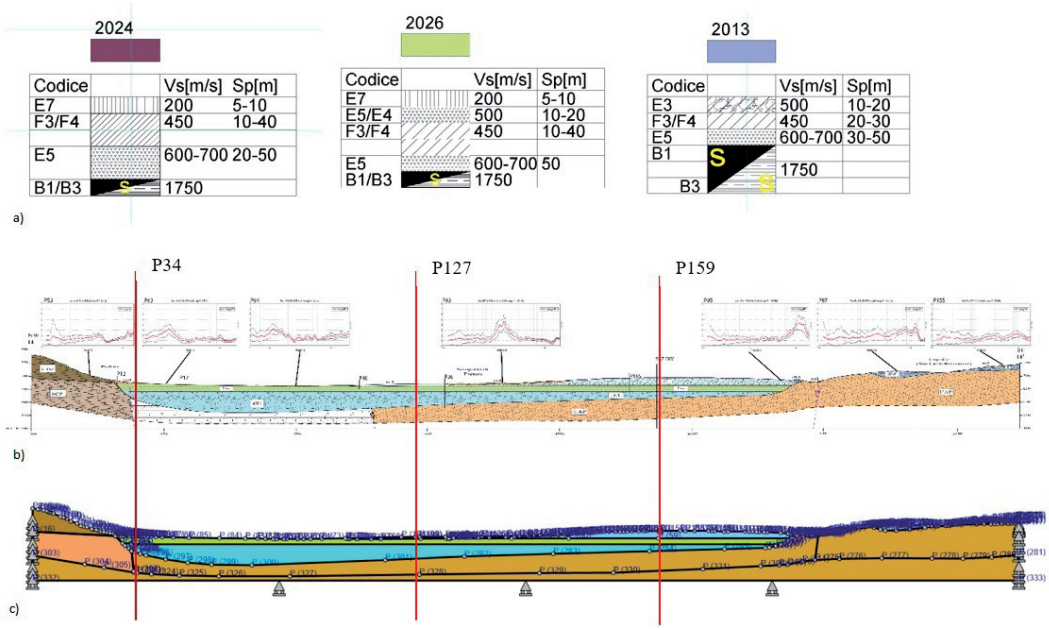

Fig. 2 – a) Stratigrafie MOPS utilizzate nella modellazione 1D e 2D (B1 - rocce stratificate strutturalmente ordinate; B3 - rocce stratificate costituite da alternanze ordinate di livelli lapidei e livelli pelitici (con contrasto di competenza); E3 - ghiaia-sabbiosa; E5 - sabbia-ghiaiosa; E7 – limo-sabbioso; F3 – limo – argilloso; F4 - argilla – limosa (AA.VV., 2014); b) sezione geologica B-B' (Preturo-Macchione), AA.VV., 2014; c) sezione B-B': uscita grafica della mesh ottenuta con il software LSR 2D.

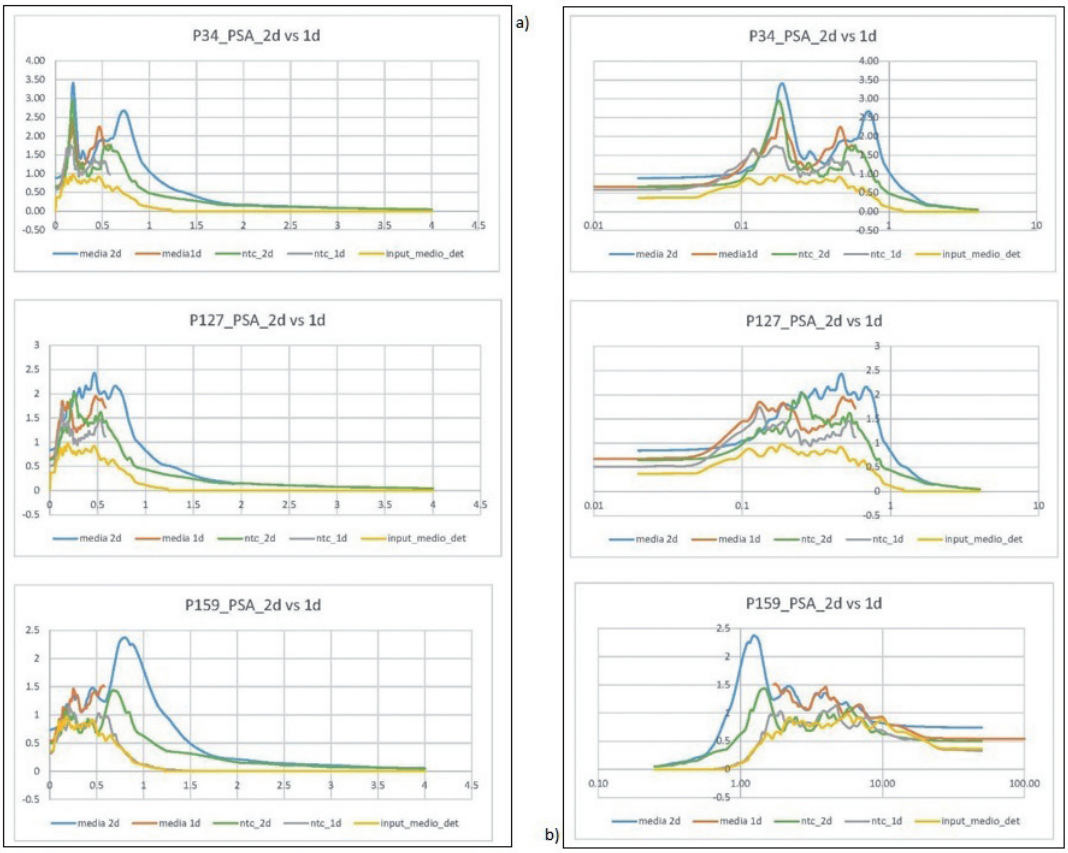

Fig. 3 – Confronto dei diagrammi di output degli spettri di risposta in PSA (pseudo- accelerazione) in funzione del periodo (colonna a) e della frequenza (colonna b) relativi ai risultati preliminari per le tre verticali analizzate (P34, P127, P159) nelle modellazioni numeriche 1D e 2D. La curva rossa indica la media degli output DET_1, DET_2, DET_3 della modellazione1D, quella blu indica la media nella modellazione 2D, la grigia e la verde indicano rispettivamente l'output dell'input NTC in 1D ed in 2D mentre le curva gialla indica l'input medio DET_1, DET_2, DET_3 imposto al bedrock (Gruppo di Lavoro MS–AQ, 2010).

Il punto P159 è localizzato in vicinanza del bordo est della sezione sulla MOPS 2013 (Fig. 2) costituita da unità litotecniche C1, E2, E3, E4, E5, E6 dell'unità AT1, sovrapposte al substrato rigido o su unità F3, F4 di LAC e E5 di ALL1, con spessori e rapporti variabili (AA. VV, 2014; Regione Abruzzo, 2012). Sono state assegnate alle unità litotecniche delle MOPS (AA.VV, 2014) le curve $G/G_0 - \gamma$ e $D - \gamma$ del Gruppo di lavoro MS (2008). Per le sabbie la curva proposta da Seed e Idriss (1970) è stata assegnata alle unità litotecniche E3, E4, E5 e E7 (Regione Abruzzo, 2012). Per le argille la curva proposta da Seed e Sun (1989) è stata assegnata alle unità litotecniche F3 e F4 (Regione Abruzzo, 2012). Per il bedrock è stata utilizzata la formulazione standard rispettivamente per i due codici di calcolo EERA (Idriss e Sun, 1992) e LSR 2D (http://www.stacec.com/).

Conclusioni. Numerosi sono i casi in letteratura di analisi numeriche e sperimentali che hanno affrontato i fenomeni di amplificazione locale conseguenti agli effetti topografici e a quelli di bordo nelle valli. Nel nostro caso il confronto tra gli spettri di risposta ed i massimi in ampiezza in output relativi ai modelli 1D e 2D è in buon accordo in corrispondenza della zona centrale della valle (P127), dove non sono presenti irregolarità morfologiche e stratigrafiche (Fig. 2). Mentre tale confronto evidenzia variazioni nei valori in corrispondenza delle estremità

della valle (P34, P159) (Fig. 2), soprattutto in termini di frequenza, registrando un aumento in ampiezza e nel contenuto in energia alle frequenze più basse, fenomeno dovuto principalmente alla focalizzazione delle onde sismiche (Fig. 3).

I risultati delle modellazioni 1D e 2D evidenziano una notevole corrispondenza tra le frequenze di risonanza dei depositi di riempimento ottenute con numerose misure di microtremore effettuate nell'area e quelle calcolate dalle simulazioni numeriche 1D e 2D. Tale corrispondenza conferma la bontà del modello geologico-geotecnico validando così la configurazione geometrica del sito (andamento della profondità del bedrock, spessore costante e andamento suborizzontale dei depositi di riempimento nel centro della valle), i valori di Vs stimati e l'impostazione del modello geotecnico-geofisico per il codice di calcolo LSR 2D (parametri geotecnici fin ad ora utilizzati) (Fig. 3).

Bibliografia

AA.VV.; 2014: Progetto Pilota per la Microzonazione Sismica di Livello 1 del Comune di L'Aquila, zona Preturo-Sassa. Regione Abruzzo

Gruppo di lavoro MS; 2008: *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*. Conferenza delle Regioni e delle Province autonome - Dipartimento della protezione civile, Roma, 3 vol. e Dvd

Gruppo di Lavoro MS–AQ; 2010: *Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana*. *Regione Abruzzo* - Dipartimento della Protezione Civile, L'Aquila, 3 vol.

Hudson M.B., Idriss I.M. e Beikae M.; 1993: QUAD4M – *A computer program for evaluating the seismic response of soil structures by variable damping finite element procedures*. Center for Geotech. Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis.

Idriss I.M., Lysmer J., Hwang R. e Seed B.H.; 1973: *Quad4 A computer program for evaluating the seismic response of soil structures by variable damping finite element procedures*: Open Report, University of California, Berkeley.

Idriss I.M. e Sun J.I.; 1992: *SHAKE91 – a computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soils deposits*. University of California, Davis.

Regione Abruzzo; 2012: Linee guida: standard di rappresentazione cartografica e archiviazione informatica, specifiche tecniche per la redazione degli elaborati cartografici ed informatici relativi al primo livello delle attività di Microzonazione Sismica – Versione 1.2 L'Aquila, 30 Luglio 2012.

Sabetta F. e Pugliese A.; 1996: *Estimation of response spectra and simulation of non-stationary earthquake ground motions*. Bull. Seism. Soc. Am., **86**, 337-352.

Seed H.B. e IDRISS I.M.; 1970: *Soil Moduli and damping factors for dynamic response analysis*. EERC-Report 70-10, Berkeley, California.

Seed H.B. e Sun J.H.; 1989: *Implication of site effects in the Mexico City earthquake of September 19, 1985 for Earthquake-Resistant Design Criteria in the San Francisco Bay Area of California*. Report No. UCB/ EERC-89/03, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.