

## **ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE DEL CENTRO ABITATO DI FIVIZZANO (MS)**

**V. D'Intinosante<sup>1</sup>, GDL-Fivizzano<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Settore Sismica, Regione Toscana, Firenze, Italia

<sup>2</sup> Il GDL (Gruppo di Lavoro) Fivizzano: M. Baglione, V. D'Intinosante, F. Vannini, L. Nistri, P. Fabbroni (Settore Sismica, Regione Toscana); A. Puccinelli, G. D'Amato Avanzi (Dipartimento Scienze della Terra – Università di Pisa); G. Naso (Dipartimento della Protezione Civile Nazionale, Ufficio rischio sismico – Roma); G. Cavuoto, V. Di Fiore, N. Pelosi, M. Punzo, D. Tarallo (CNR– IAMC di Napoli); S. Piscitelli, A. Perrone, J. Bellanova, G. Calamita (CNR– IMAA di Potenza); M. Moscatelli, A. Pagliaroli, M. Simionato, D. Pileggi, A. Avalle (CNR– IGAG di Roma); G. Vessia (INGEO – Università di Chieti); G. Ginesi (Ufficio Cave e Ambiente – Comune di Fivizzano, MS)

**Introduzione.** Il centro abitato di Fivizzano, ubicato nell'area sismica della Lunigiana (Toscana settentrionale) è già da molti anni oggetto di studi “pilota” finalizzati alla definizione del modello geologico-tecnico del sottosuolo e conseguente valutazione della risposta sismica locale (D'Intinosante, 2003; Rainone *et al.*, 2004; Cherubini *et al.* 2004, 2006).

Queste attività, avviate alla fine degli anni '90 nell'ambito del Progetto VEL (Ferrini *et al.*, 2007) sono state utilizzate come base conoscitiva di partenza per l'attività di microzonazione di terzo livello effettuata dal Gruppo di Lavoro multidisciplinare (denominato GdL Fivizzano) costituitosi nel 2013.

Il GdL Fivizzano, istituito dalla Regione Toscana di concerto con il Dipartimento della Protezione Civile nazionale, è pervenuto ad una stima quantitativa dell'amplificazione locale nel centro abitato di Fivizzano, mediante le seguenti fasi di analisi:

1. definizione del modello di sottosuolo definitivo dell'area (D'Intinosante *et al.*, 2014) mediante l'analisi integrata dei dati geologici di superficie e di sottosuolo sia pregressi (campagne d'indagine 2000-2006) che di nuova elaborazione (2013-2014);
2. realizzazione di analisi di risposta sismica locale monodimensionali e bidimensionali e calcolo di diversi fattori di amplificazione al fine di individuare i più idonei per la quantificazione dell'amplificazione nell'area d'indagine;
3. estrapolazione areale dei risultati ottenuti in termini di fattori di amplificazione e conseguente definizione della carta di Microzonazione sismica di terzo livello.

La presente nota si propone di illustrare sinteticamente le attività riportate al precedente punto 2, discutendo le scelte metodologiche effettuate durante il complesso lavoro di ricostruzione del modello fisico-tecnico di sottosuolo e della sua trasposizione in modello numerico, finalizzato alle analisi di risposta sismica locale.

**Modello numerico e risultati delle analisi di risposta sismica locale.** L'input sismico è stato definito mediante la procedura messa a punto dall'Università di Pavia nell'ambito di un Accordo di Collaborazione Scientifica con la Regione Toscana (<http://www.regione.toscana.it/speciali/rischio-sismico/banche-dati>).

In tale ambito è stato sviluppato il codice di calcolo SCALCONA 2.0 (*SCALing of COmpatible Natural Accelerograms*) che, in funzione del sito e del periodo di ritorno considerato, restituisce una combinazione di sette accelerogrammi compatibili con gli spettri NTC08 per condizioni di roccia piana affiorante (Cat. A – T1) (Zuccolo *et al.*, 2011, 2012, 2014; Rota *et al.*, 2012).

In particolare, per tutto il territorio toscano, è possibile selezionare differenti periodi di ritorno (30, 50, 72, 101, 140, 201, 475, 712 e 949 anni). Ai fini della microzonazione sismica del centro abitato di Fivizzano per l'input sismico è stato scelto un periodo di ritorno di 475 anni, in accordo con altri studi nazionali ed internazionali (Ansal *et al.*, 2009).

Definito il modello di sottosuolo in termini sia di caratteristiche morfologiche e geometriche sepolte sia di parametrizzazione dinamica dei terreni (D'Intinosante *et al.*, 2014) si è proceduto ad una preliminare disamina di alcune delle verticali di output, mediante analisi numeriche monodimensionali, al fine di stabilire quale fosse l'ottimale quota di imposizione dell'input (bedrock sismico) tra due ipotesi di lavoro proposte al GdL.

Secondo la prima ipotesi, definita "superficiale", l'input sismico è stato posto in corrispondenza della prima formazione rocciosa (con  $V_s \geq 800$  m/s) incontrata al di sotto delle coperture alluvionali-detritiche; le quote corrispondenti a questi contatti sono molto variabili all'interno della zona di studio. La seconda ipotesi di lavoro è stata definita "profonda" ed è consistita nella imposizione dell'input sismico in corrispondenza della formazione del Macigno (MAC). Essa per quasi tutta l'interezza dell'area di Fivizzano è sottostante alle formazioni argillitiche e calcaree dell'Unità alloctona di Canetolo. La prima ipotesi presenta il vantaggio di utilizzare un'ottima caratterizzazione fisico-meccanica di tutte le formazioni interessate, ampiamente raggiunte dalle indagini geofisiche eseguite. Nella seconda ipotesi, aumentando notevolmente la profondità d'interesse, diminuiscono progressivamente con la profondità la qualità e la quantità dei dati disponibili, con conseguenti maggiore ignoranza incertezza sui reali valori dei parametri nel modello di input assunti nelle analisi numeriche.

Dopo l'analisi numerica 1D preliminare, nonostante le maggiori incertezze associate all'assetto profondo, è stata scelta la seconda ipotesi poiché ha consentito una maggiore omogeneità di analisi tra le differenti sezioni (unico bedrock sismico posto a quote comparabili)

ed una maggiore coerenza nei confronti dell'assetto stratigrafico dell'area fivizzanese. Inoltre, l'analisi "profonda" ha mostrato risultati in termini di spettri di risposta elastici sempre più conservativi dell'ipotesi "superficiale".

Le analisi di risposta sismica locale sono state eseguite in assetto bidimensionale, mediante l'ausilio del software agli elementi finiti QUAD4M (Hudson *et al.*, 1994) che modella la non linearità dei terreni mediante un approccio lineare equivalente.

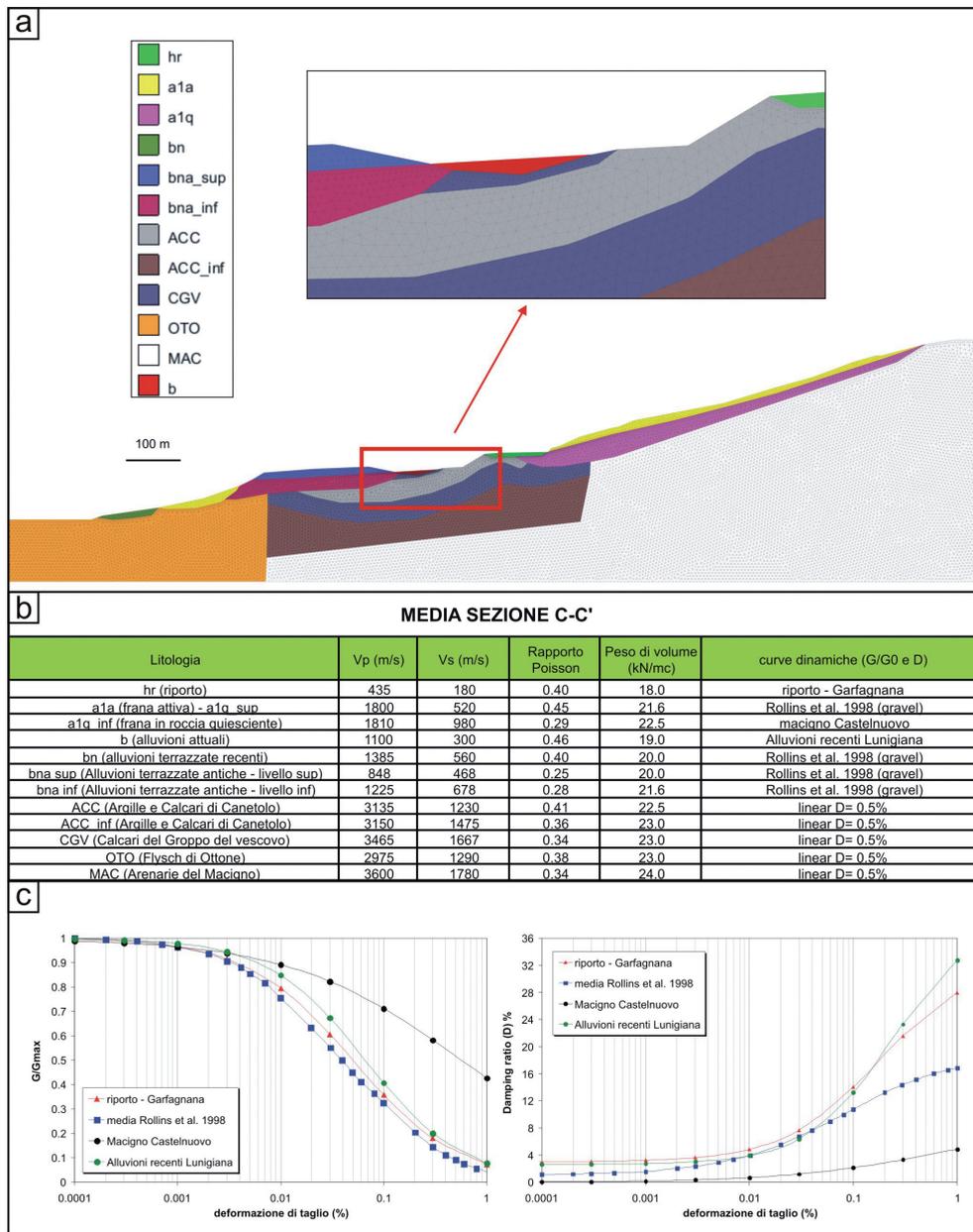


Fig. 1 – Modello geologico-tecnico di input relativo alla sezione C-C' ed implementato per le analisi di risposta sismica bidimensionale nel centro abitato di Fivizzano (MS): a) modello discretizzato della sezione; b) parametri fisico-meccanici in campo dinamico associati ai litotipi oggetto di analisi; c) curve dinamiche di degradazione del modulo di taglio (G/G0) e del damping (D) utilizzate nelle modellazioni mono e bidimensionali.

In Fig. 1a è possibile osservare una delle 5 sezioni geologico-tecniche (sezione C-C') sottoposte ad analisi di risposta sismica locale, in cui le formazioni oggetto di analisi sono state discretizzate mediante elementi finiti triangolari, le cui dimensioni massime sono state selezionate secondo la regola (Kuhlemeyer e Lysmer, 1973):

$$D_{max} = \lambda / k = (T V_s) / k \quad (1)$$

dove  $V_s$  è la velocità di propagazione delle onde di taglio (ricavata dalle indagini geofisiche dirette ed illustrate per la sezione C-C' in Fig. 1b, dove è possibile osservare un prospetto sintetico dei parametri meccanici associati ad ogni litotipo),  $T$  è il periodo corrispondente alla più corta onda sismica propagabile e posto pari a 0.05 s (frequenza massima propagata pari a 20 Hz). Tale periodo è quindi il minor periodo per cui si può ritenere attendibile il dato di output. Il coefficiente  $k$  è stato posto pari a 8 (Lanzo e Silvestri, 1999).

Le curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato ( $G/G_0$ ) e di incremento del rapporto di smorzamento  $D(\gamma)$  (Fig. 1c) utilizzate per simulare il comportamento non lineare dei terreni mediante il legame costitutivo lineare equivalente, sono state desunte principalmente dalla banca dati realizzata in ambito VEL su terreni analoghi, sotto il profilo fisico-meccanico, a quelli indagati e campionati in Toscana settentrionale. Fa eccezione la curva relativa alle alluvioni recenti ed antiche, prevalentemente ghiaiose, per le quali è stata scelta una curva di bibliografia (Rollins *et al.*, 1998).

Per quanto riguarda le analisi in campo bidimensionale, sono state analizzate 5 sezioni e lungo di esse sono stati scelti 318 punti di output, attraverso i quali è possibile esaminare in maniera pressoché continua la variazione areale dell'amplificazione sismica locale. Inoltre, su 49 di questi punti sono state considerate le verticali sottostanti con le loro successioni litostratigrafiche e sono state eseguite, a scopo di confronto, analisi di risposta sismica in assetto monodimensionale mediante il software monodimensionale 1D STRATA (Kottke e Rathje, 1998).

Inoltre, nelle analisi 1D, sono state fatte variare le curve  $G/G_0$  e  $D(\gamma)$  associate alle coperture (principalmente alluvioni e depositi di riporto) imponendo, rispetto ai valori medi utilizzati per analisi 2D, limiti inferiore e superiore di variazione (Derendeli, 2001). Tale indagine ha avuto lo scopo di valutare l'effetto sui risultati dell'incertezza associata alla caratterizzazione non lineare.

Poiché i risultati delle analisi eseguite con curve variabili hanno prodotto storie temporali e spettri di risposta simili in valore medio rispetto a quelli ottenuti con le analisi con curve fisse, si è proceduto mantenendo fisso il valore delle curve  $G/G_0$  e  $D$  nelle analisi numeriche 1D.

In Fig. 2 sono illustrati, per la sezione C-C', gli output delle analisi di risposta sismica in termini di spettri di risposta elastici (valori medi su tutti gli input utilizzati) per ognuna delle dieci verticali in cui è stata effettuata la taratura mediante approccio monodimensionale. In figura è possibile osservare in rosso gli spettri derivanti da analisi bidimensionale ed in blu quelli relativi alle omologhe modellazioni in campo 1D.

Per la sezione C-C' gli spettri di risposta 2D tendono ad essere globalmente sempre più conservativi degli spettri 1D ed, in generale, per tutte le sezioni sottoposte ad analisi, solo sporadicamente il confronto dimostra il contrario e mai in corrispondenza del terrazzo alluvionale su cui poggia la maggior parte del centro abitato di Fivizzano.

Come è possibile notare in Fig. 2, per ognuno dei punti di output, l'amplificazione locale si verifica per periodi inferiori a 0.8 s ed assume particolare rilievo per  $T < 0.5$  s. Tale condizione, estendibile a tutta l'area del centro abitato di Fivizzano, è ben correlabile con le caratteristiche sismostratigrafiche dei terreni investigati e con i risultati delle misure passive a stazione singola (H/V) realizzate per la definizione del modello geologico-tecnico dell'area (D'Intinosante *et al.*, 2014).

I risultati delle analisi di risposta sismica 1D e 2D eseguite mediante input sismici naturali sono stati confrontati anche con i risultati delle simulazioni numeriche condotte applicando un segnale artificiale di input, generato mediante il codice Belfagor (Mucciarelli *et al.*,

2004). L'input artificiale è stato calcolato imponendo i vincoli di spettro compatibilità con lo spettro di riferimento ed assegnando una coppia magnitudo-distanza dedotta dallo studio di disaggregazione (Progetto INGV-DPC S1, 2006). Dal confronto è stato possibile notare come i due approcci offrano risultati simili in termini di spettri di risposta elastici, sia in assetto bidimensionale sia con approccio monodimensionale.

Inoltre, le analisi di risposta sismica eseguite in assetto bidimensionale con il codice di calcolo Quad4M sono state confrontate con omologhe analisi 2D eseguite con un codice di

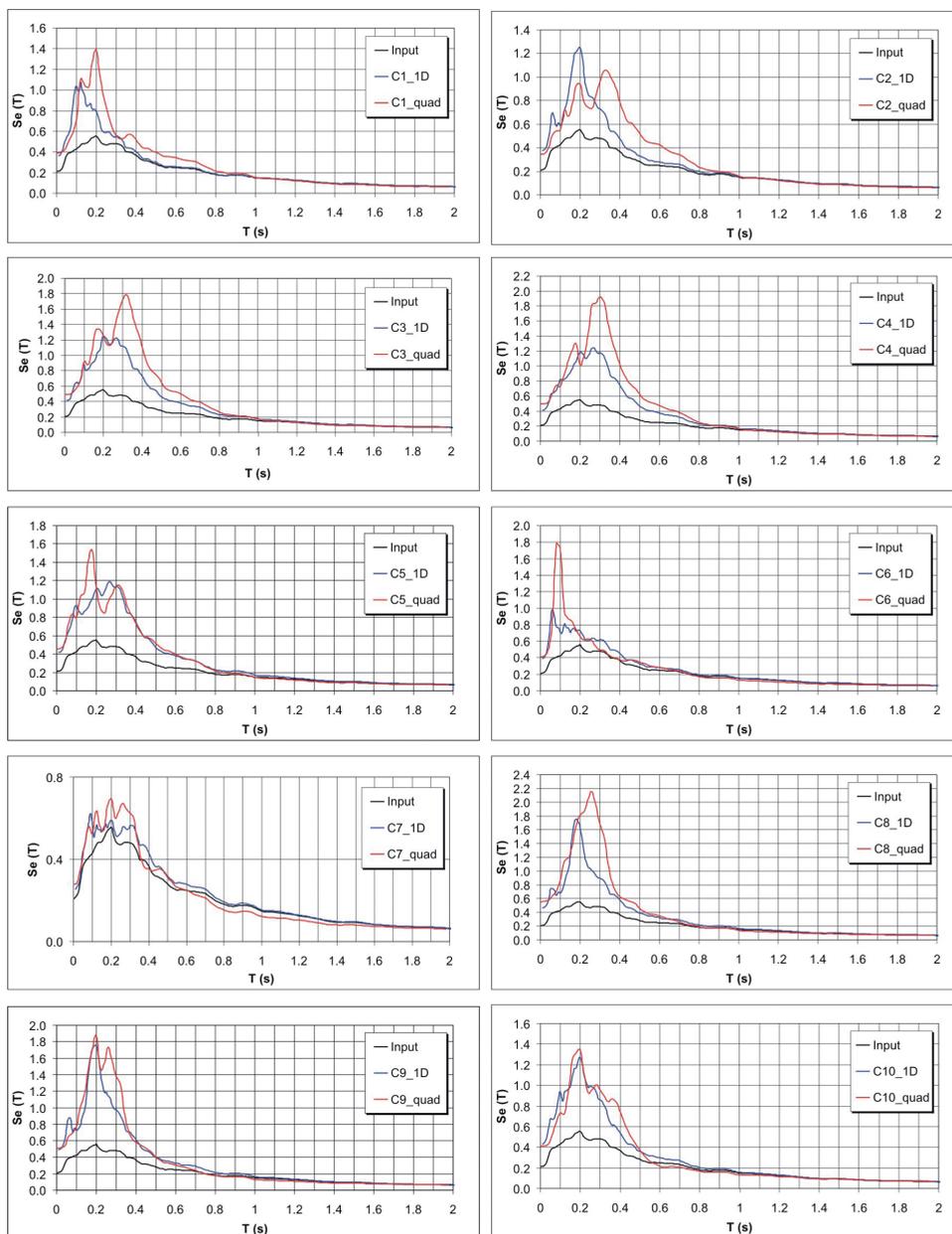


Fig. 2 – Confronto in termini di spettri di risposta elastici al 5% di smorzamento tra i risultati delle analisi bidimensionali (linee rosse) e monodimensionali (linee blu) per 10 verticali di output della sezione geologico-tecnica C-C'. In nero è riportato, invece, lo spettro medio relativo al moto di input.

calcolo commerciale, denominato LSR2D 3.0 (Stacec, 2015; www.stacec.com). Il programma agisce con modalità similari al Quad4M e, al netto di alcune differenze di implementazione del modello e di discretizzazione della mesh, ha mostrato risultati globalmente confrontabili con quelli di Quad4M.

Al fine di poter scegliere il parametro in grado rappresentare meglio l'amplificazione locale nell'area di studio e poter, conseguentemente, provvedere all'estensione areale del dato, sono stati calcolati differenti fattori di amplificazione, di seguito illustrati:

$$FH_{(0,1\div 0,5)} = \frac{\int_{0,1}^{0,5} PSV_{out}(T)dT}{\int_{0,1}^{0,5} PSV_{in}(T)dT} \quad (2)$$

$$FH_{(0,5\div 1,0)} = \frac{\int_{0,5}^{1,0} PSV_{out}(T)dT}{\int_{0,1}^{0,5} PSV_{in}(T)dT} \quad (3)$$

$$FHa_{(0,1\div 0,5)} = \frac{\int_{0,1}^{0,5} PSA_{out}(T)dT}{\int_{0,1}^{0,5} PSA_{in}(T)dT} \quad (4)$$

$$FHa_{(0,5\div 1,0)} = \frac{\int_{0,5}^{1,0} PSA_{out}(T)dT}{\int_{0,1}^{0,5} PSA_{in}(T)dT} \quad (5)$$

$$FA \quad \text{Cap. 2.5.3.3.2 degli ICMS (2008)} \quad (6)$$

$$FV \quad \text{Cap. 2.5.3.3.2 degli ICMS (2008)} \quad (7)$$

dove *FH* è il valore del fattore di amplificazione calcolato come intensità di Housner (Housner, 1959) per due differenti intervalli di integrazione (0.1-0.5 s e 0.5-1.0 s); *FHa* è un fattore simile a quello proposto da Housner ma calcolato sullo spettro in accelerazione (PSA); *FA* ed *FV* sono i fattori proposti al cap. 2.5.3.3.2 degli ICMS 2008.

Tutti i fattori precedentemente descritti sono stati calcolati per ognuna delle 318 verticali 2D e per le 49 analisi di taratura in campo monodimensionale.

In Fig. 3 è riportato l'andamento spaziale dei fattori di amplificazione in corrispondenza della sezione C-C'. Al fine di consentire una migliore lettura dei dati non sono stati graficati i valori di *FH* ed *FHa* negli intervalli di integrazione 0.5-1.0 s poiché poco significativi per il contesto geologico e sismostratigrafico caratteristico del centro abitato di Fivizzano dove i fenomeni di amplificazione sismica locale, come detto, sono concentrati a periodi inferiori a 0.5 s. Occorre infine ricordare che i fattori *FA* e *FV*, per come sono definiti, non sono associabili ad un intervallo di periodi prefissato come accade per quelli definiti in termini di intensità di Housner.

**Conclusioni.** Il contributo presenta i risultati delle analisi numeriche 1D e 2D effettuate su 5 sezioni significative individuate nell'area urbana di Fivizzano. Dall'osservazione dell'andamento dei fattori illustrati in Fig. 3 è possibile trarre le seguenti conclusioni:

1. L'amplificazione locale nell'area fivizzanese si dimostra da elevata a molto elevata ad esclusione delle aree (di estensione limitata) in cui il substrato sismico è affiorante o dove le coperture sismiche di natura alluvionale o detritica sono esigue;
2. *FH* ed *FHa* derivanti dalle analisi 2D mostrano un andamento simile con massimi di

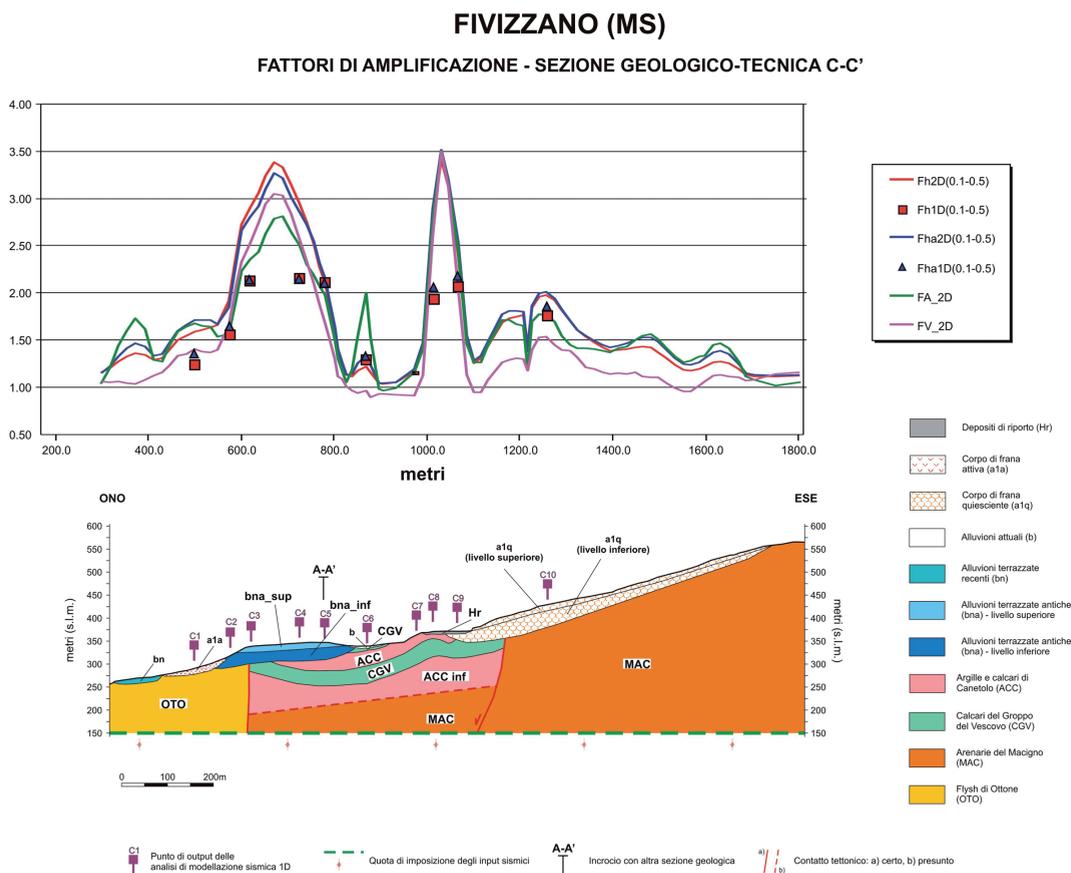


Fig. 3 – Rappresentazione dell'andamento dei fattori di amplificazione calcolati per la sezione geologico-tecnica C-C' (la descrizione dei fattori di amplificazione è fornita nel testo).

amplificazione posti in corrispondenza del terrazzo costituito da depositi alluvionali antichi (bna) e dei depositi di riporto su cui è ubicata l'area ospedaliera (in corrispondenza dei punti C8 e C9), dove i fattori di amplificazione eccedono il valore di 2.5 con picchi fino a 3.5;

3. Il fattore *FA*, ad esclusione di alcune limitate verticali di output si mostra in buon accordo con i fattori precedentemente indicati;
4. Il fattore *FV* concorda bene con gli altri fattori nelle aree di picco dell'amplificazione, ma sottostima sensibilmente l'amplificazione nei rimanenti settori della sezione;
5. Le analisi 1D forniscono fattori di amplificazione inferiori a quelli delle analisi 2D pur cogliendo la variazione dell'amplificazione lungo la sezione e quindi la differenziazione quantitativa tra le varie zone. Le maggiori sottostime si hanno dove i fenomeni di amplificazione 2D legati alla morfologia superficiale e sepolta sono particolarmente pronunciati (si vedano le progressive 700 m e 1000 m).

#### Bibliografia

- Ansal A, Tönük G, Kurtulus A.; 2009: *Microzonation for urban planning*. In: Tankut AT (ed) Earthquakes and tsunamis, geotechnical, geological, and earthquake engineering, vol 11, pp 133–152
- Cherubini C., D'Intinosante V., Ferrini M., Lai C., Lo Presti D.C., Rainone M.L., Signanini P. Vessia G.; 2004: *Problems associated with the assessment of local site effects through a multidisciplinary integrated study: the case of Fivizzano's town (Italy)*. Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, New York, April 13-17 2004.

- Cherubini C., D'Intinosante V., Ferrini M., Rainone M.L., Signanini P. Vessia G.; 2006: *Approccio multidisciplinare per la valutazione della risposta sismica locale nell'ambito del progetto Vel: il caso dei comuni di Fivizzano e Liciana Nardi (Lunigiana)*. Giornale di Geologia Applicata 4 (2006) 169-174.
- Darendeli, M. (2001). "Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves." Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Eng., Univ. of Texas, Austin
- D'Intinosante V.; 2003: *Valutazione della risposta sismica locale in un sito della Lunigiana (Toscana Settentrionale). Analisi dei risultati preliminari*. Atti del I Congresso dell'Associazione Italiana di Geologia Applicata ed Ambientale. Chieti, 19-20 Febbraio. pp. 343-353.
- D'Intinosante V., GdL Fivizzano; 2014: *Definizione del modello integrato di sottosuolo propedeutico alla realizzazione di studi di microzonazione sismica di livello 3 nel centro abitato di Fivizzano (MS)*. Atti del XXXIII Convegno Nazionale NGGTS, Bologna.
- DM 14.1.2008. *Norme tecniche per le Costruzioni*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana 29.
- Ferrini M., Baglione M., Calderini F., D'Intinosante V., Danise S., Di Lillo R., Fabbroni P., Iacomelli S., Rossi M., Stano S. Calosi E.; 2007: *Le attività della Regione Toscana per la valutazione degli effetti locali dei terreni: il programma regionale V.E.L.* XII Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia", Pisa 10-14 giugno 2007.
- Housner G.W.; 1959: *Behaviour of structures during earthquakes*. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.85, N. EM14, pp. 109-129.
- Hudson M, Idriss IM, Beikae M: 1994: *QUAD4M: a computer program to evaluate the seismic response of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base*. Dpt. of Civil and Environmental Eng., Univ. of California Davis, Davis California
- ICMS - Gruppo di lavoro MS.; 2008: *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*, 3 vol. e DVD.
- Kottke A. R., Rathje E.M.; 2008: *Technical Manual for Strata*. PEER 2008/10;
- Kuhlemeyer R.L., Lysmer J.; 1973: *Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems*. *J. Soil Mech. & Foundations*. Div. ASCE 99 (SM5), 421-427.
- Lanzo G., Silvestri F.; 1999: *Risposta sismica locale (teoria ed esperienze)*. Edizioni Hevelius
- Mucciarelli M., Spinelli A. Pacor F.; 2004: *Un programma per la generazione di accelerogrammi sintetici "fisici" adeguati alla nuova normativa*. XI Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia", Genova 25-29 gennaio 2004.
- Progetto INGV-DPC S1; 2006: *Proseguimento della assistenza al DPC per il completamento e la gestione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 e progettazione di ulteriori sviluppi. Convenzione INGV-DPC (2004-2006)*. Task 1 – Completamento delle elaborazioni relative a MPS04. <http://esse1.mi.ingv.it>
- Rainone M.L., Ferrini M., Signanini P. D'Intinosante V.; 2004: *Evaluation of local amplification in the seismic microzonation: comparison between punctual multidisciplinary integrated studies and macroseismic methods in Fivizzano's area (Toscana, Italy)*. Geotechnical and Geological Engineering, Volume 22, Issue 2, 2004, Pages 227 – 244.
- Rollins K.M., Evans M., Diehl N., Daily W.; 1998: *Shear modulus and damping relationships for gravels*. J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engrg., 124 (5), 396-405.
- Rota M., Zuccolo E., Taverna L., Corigliano M., Lai C. G. Penna A.; 2012: *Mesozonation of the Italian territory for the definition of real spectrum-compatible accelerograms*. *Bull Earthquake Eng* (2012) 10:1357–1375.
- Zuccolo E, Corigliano M., Taverna L. Lai C.G.; 2011: *Meso-zonazione di un territorio per la definizione di accelerogrammi reali spettro-compatibili*. XIV Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia", Bari 18-22 settembre 2011.
- Zuccolo E, Rota M., Lai C.G., Taverna L., Corigliano M. Penna A.; 2012: *Definition of Spectrum-Compatible Natural Records for the Italian Territory*. 15<sup>th</sup> World Conferences on Earthquake Engineering (WCEE), Lisboa 24-28 september 2012.
- Zuccolo E, Corigliano M. Lai C.G.; 2014: *Selection of spectrum- and seismo-compatible accelerograms for the Tuscany region in Central Italy*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 66 (2014) 305–313.