

DEFINIZIONE DEL MODELLO INTEGRATO DI SOTTOSUOLO PROPEDEUTICO ALLA REALIZZAZIONE DI STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO 3 NEL CENTRO ABITATO DI FIVIZZANO (MS)

V. D'Intinosante¹, GDL Fivizzano²

¹ Ufficio Prevenzione Sismica, Regione Toscana, Firenze

² GDL (Gruppo di Lavoro) Fivizzano:

M. Baglione, V. D'Intinosante, F. Vannini, P. Fabbroni (Ufficio Prevenzione Sismica, Regione Toscana)

A. Puccinelli, G. D'Amato Avanzi (Dipartimento Scienze della Terra – Università di Pisa)

G. Naso (Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico, Dipartimento della Protezione Civile, Roma)

G. Cavuoto, V. Di Fiore, N. Pelosi, M. Punzo, D. Tarallo (CNR– IAMC, Napoli)

S. Piscitelli, A. Perrone, J. Bellanova, G. Calamita (CNR– IMAA, Potenza)

M. Moscatelli, A. Pagliaroli, M. Simionato, D. Pileggi (CNR– IGAG, Roma)

G. Vessia (INGEO – Università di Chieti)

Introduzione. La Regione Toscana ha avviato a partire dal 1997, con il Programma di Valutazione Effetti Locali (denominato Progetto VEL), un importante programma di studi ed indagini, finalizzato alla realizzazione di studi di Microzonazione Sismica di tipo quantitativo (attualmente definiti di Livello 3) nelle aree regionali a maggior pericolosità sismica di base (Ferrini *et al.*, 2007).

Il Progetto VEL è attualmente attivato nelle aree della Lunigiana, Garfagnana e media Valle del Serchio, Montagna Pistoiese, Mugello e Val di Sieve, Casentino, Valtiberina ed Amiata, per un totale di 90 comuni e 207 centri abitati oggetto d'indagine.

In queste aree, ad oggi, sono state realizzate:

- circa 1100 linee di sismica a rifrazione con onde P e SH (circa 110 km totali);
- circa 500 sondaggi geotecnici (più di 1400 prove SPT) con relative prove down-hole in foro (più di 15 km di profondità totale);
- oltre 500 campioni indisturbati prelevati su cui sono state eseguite circa 500 prove statiche e circa 250 prove dinamiche;
- circa 20 comuni indagati con prove HVSR per la stima diretta della frequenza fondamentale di risonanza di sito;
- Cartografie geologiche e geomorfologiche di dettaglio (in scala 1:2000).

Tali studi hanno recentemente subito una forte accelerazione grazie ai finanziamenti nazionali previsti con l'OPCM 3907/2010 e s.m.e i. in attuazione dell'articolo 11 della legge 24 giugno 2009, n. 77. In alcuni comuni, sia afferenti a questo progetto co-finanziato dallo Stato, sia già finanziati nell'ambito dei progetti regionali di prevenzione sismica, è stato possibile terminare gli studi avviati in ambito VEL attraverso la realizzazione di cartografie di Microzonazione Sismica di Livello 3, secondo gli standard previsti dagli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" (di seguito indicato con la sigla ICMS) approvati il 13 novembre 2008 dalla Conferenza delle Regioni e delle Province autonome.

Tale livello di approfondimento è stato possibile grazie all'elevato numero di indagini di esplorazione del sottosuolo realizzate negli anni precedenti; ciò ha permesso, mediante una implementazione "low-cost" sul quadro conoscitivo tramite la realizzazione di indagini geofisiche di superficie (possibili grazie al cofinanziamento nazionale), una buona ricostruzione

dell'assetto geologico-tecnico (superficiale e sepolto) con conseguente caratterizzazione fisico-meccanica in campo dinamico dei terreni oggetto di studio.

Tra i comuni oggetto d'indagine in ambito VEL, spicca, per quantità e livello di attività realizzate, il centro abitato di Fivizzano (MS).

La scelta di questo comune come area pilota è stata dettata sia dalla non trascurabile sismicità storica della Lunigiana (colpita nei secoli passati da eventi sismici d'intensità medio-elevata) e dal fatto che Fivizzano è stato uno dei comuni più danneggiati dall'evento sismico del settembre 1920. A queste condizioni, si aggiungono, per l'area del capoluogo, condizioni geologiche *s.l.*, superficiali e sepolte, predisponenti l'attivazione di fenomeni di amplificazione locale.

Al fine di comprendere l'assetto geologico alla base del probabile innesco di fenomeni di amplificazione locale, nel corso degli ultimi 15 anni è stata realizzata una copiosa campagna di esplorazione multidisciplinare del sottosuolo la quale, unitamente al rilievo geologico di campagna effettuato dal Dipartimento di Scienze della terra dell'Università di Pisa, ha consentito la definizione di un modello geologico preliminare e un'analisi di risposta sismica locale in assetto monodimensionale e bidimensionale (D'Intinosante, 2003; Cherubini *et al.*, 2004 e 2006; Rainone *et al.*, 2004).

Tuttavia, l'elevata complessità dell'assetto geologico dell'area, sia da un punto di vista litostratigrafico, sia tettonico, sia per quanto attiene alle proprietà fisico-meccaniche in campo dinamico dei terreni coinvolti nello studio, unitamente allo spessore delle coperture frequentemente superiore a 30m dal piano campagna, ha lasciato alcuni interrogativi aperti soprattutto in merito ai rapporti tra le unità costituenti il substrato sismico e geologico ed alla caratterizzazione geometrica e fisico-meccanica del fenomeno gravitativo, ubicato nel settore est dell'area d'indagine.

A seguito dell'evento sismico del 21 giugno 2013 (magnitudo $M_l=5.2$), avente come epicentro proprio il territorio comunale di Fivizzano, di concerto con il Dipartimento della Protezione Civile, è stato costituito un Gruppo di Lavoro multidisciplinare (di seguito GdL) avente come obiettivo finale la realizzazione di un dettagliato studio di microzonazione sismica di Livello 3 sull'area del capoluogo.

La presente nota ha lo scopo di illustrare lo stato d'avanzamento delle attività del GdL, evidenziando i risultati ad oggi validati ed acquisiti, le problematiche ancora aperte e gli sviluppi futuri del progetto.

Assetto geologico dell'area. Il centro abitato di Fivizzano è caratterizzato da un substrato geologico e sismico (per lo più sepolto o affiorante alla base degli impluvi naturali che incidono profondamente in direzione NE-SW il terrazzo fluviale su cui giace il centro abitato) costituito da litotipi ascrivibili a quattro diverse formazioni: il Flysch di Ottone (OTO) appartenente all'Unità Ottone, i Calcari di Groppo del Vescovo (CGV) e le Argille e calcari di Canetolo (ACC) relative all'Unità di Canetolo e le arenarie del Macigno (MAC) afferenti alla Falda Toscana (Puccinelli *et al.*, 2005, 2010).

I depositi di copertura quaternari, in discordanza con i termini sottostanti sono costituiti da depositi di colmata e terreni di riporto (Hr), depositi detritici (a) ed i depositi alluvionali terrazzati recenti ed antichi (bn) in sinistra idrografica del torrente Rosaro. Questo corso d'acqua, oggi ben incassato nel suo alveo, a dimostrazione che l'area è tendenzialmente in una fase di sollevamento, determina la presenza di quattro ordini di terrazzi. Sul più antico di questi, giace il centro storico fivizzanese.

Al loro interno contengono livelli lenticolari di spessore metrico, caratterizzati dalla presenza di frammenti angolosi di natura arenacea (colata detritica?). La frazione coesiva è ridotta o completamente assente. Lo spessore complessivo va da pochi metri a circa 50 m.

Il deposito si presenta da moderatamente addensato ad addensato, molto permeabile, con comportamento prevalentemente granulare. La natura litologica dei depositi alluvionali terrazzati non ha permesso il prelievo di campioni indisturbati per la realizzazione di prove meccaniche di laboratorio in campo ciclico/dinamico.

Lungo le scarpate di terrazzo sono diffusi fenomeni gravitativi, talora attivi, costituiti da crolli o scivolamenti. Nel settore orientale dell'area di studio è presente un importante fenomeno gravitativo, oggetto di approfondimenti d'indagine da parte del GdL.

La definizione del modello integrato di sottosuolo. In Tab. 1 è riportato il prospetto delle indagini geotecniche e geofisiche, realizzate negli anni passati nel centro abitato di Fivizzano, al fine di definire le caratteristiche geometriche e fisico-meccaniche in campo dinamico sepolte e superficiali delle unità oggetto di studio.

Tab. 1 - Prospetto delle indagini geotecniche e geofisiche realizzate nel centro abitato di Fivizzano nel periodo 2000-2006.

TIPOLOGIA INDAGINE	n°
Sondaggi geognostici	23
Prove down-hole in onde P ed SH	11
Sismica a rifrazione in onde P ed SH	27
Sismica a riflessione HR in onde P	2
Sismica a riflessione HR in onde SH	2
Prove MASW	1
Misure di rumore a stazione singola	13
Monitoraggio sismico (weak motions)	13
TOTALE	92

Una tale quantità di indagini ha permesso una buona caratterizzazione delle unità di copertura e un'adeguata definizione dei rapporti geometrici tra le unità di copertura e il substrato sismico dell'area.

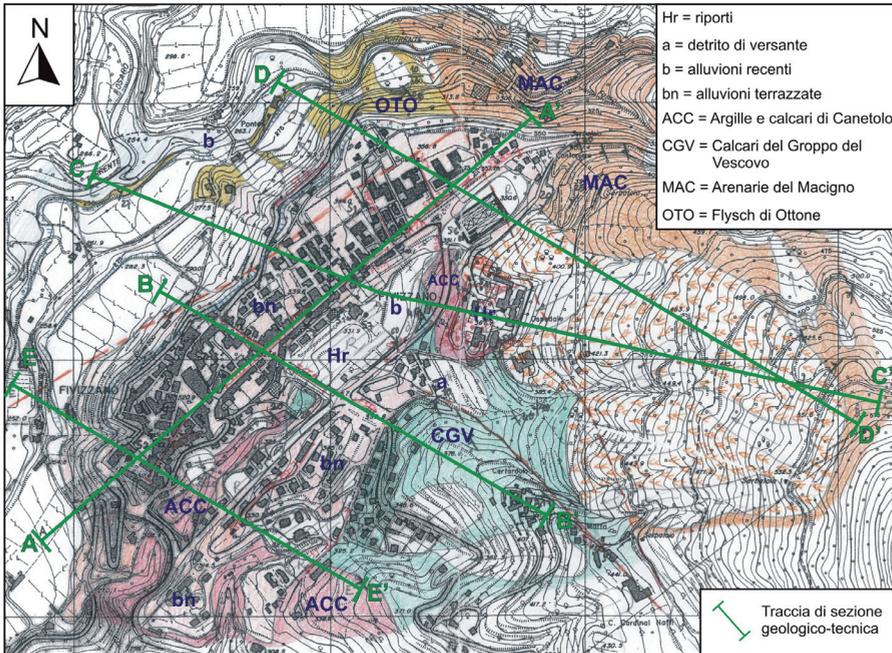


Fig. 1 – Carta geologica preliminare del centro abitato di Fivizzano realizzata dal Dip. Di Scienze della Terra dell'Università di Pisa.

Le indagini pregresse lasciavano, comunque, alcuni interrogativi soprattutto sui rapporti geometrici profondi tra le Unità di Ottone e della Falda Toscana, in contatto tettonico con l'Unità di Canetolo, le cui due formazioni presenti diffusamente nell'area dimostrano a loro volta rapporti geometrici complicati.

L'attività di revisione di tutti i dati pregressi, unitamente alla realizzazione nel dicembre 2013 di un sopralluogo congiunto nell'area d'indagine, ha permesso al GdL di giungere alla definizione, nella primavera del 2014, di un modello geologico preliminare, confluito nella revisione della cartografia geologica esistente (Fig. 1) e nella definizione di cinque sezioni geologico-tecniche, una parallela all'asse maggiore del terrazzo alluvionale su cui fonda l'abitato e 4 sezioni ad essa ortogonali, la cui ubicazione è riportata in Fig. 1.

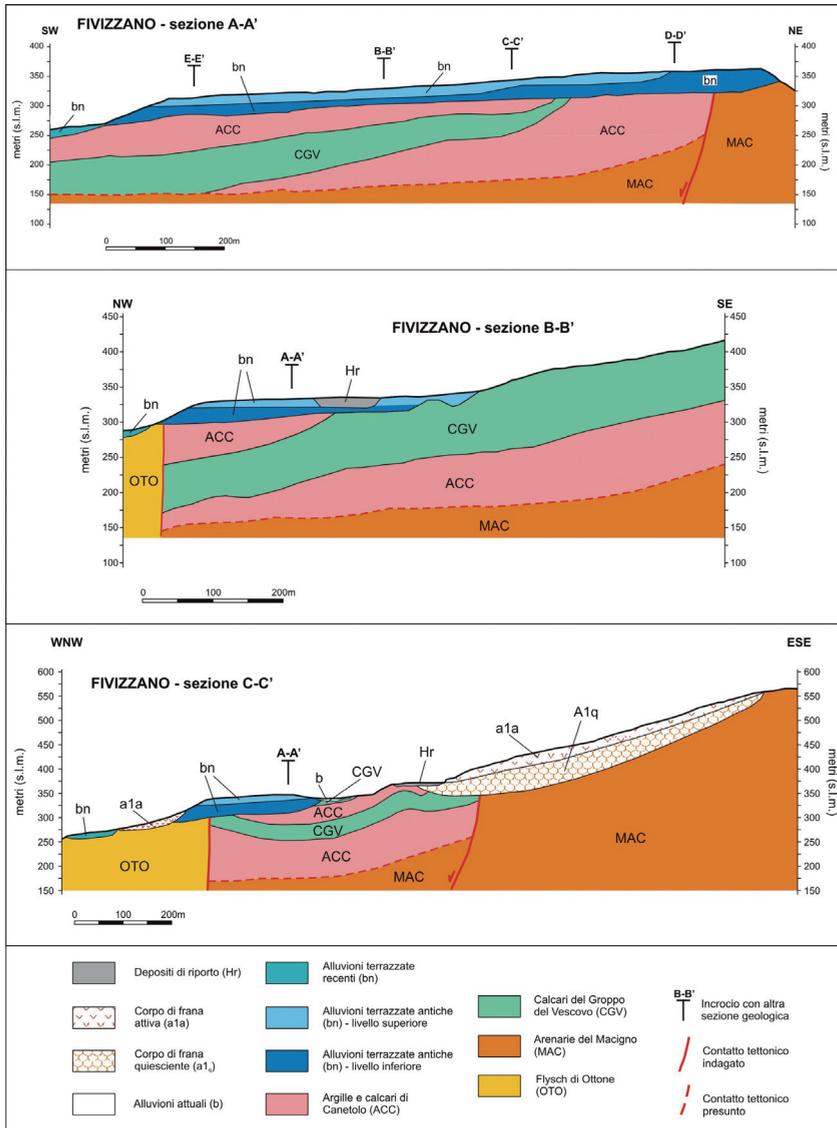


Fig. 2 – Alcune sezioni geologico-tecniche realizzate dal Dip. Di Scienze della Terra dell'Università di Pisa, le quali saranno utilizzate come input geologico per la realizzazione delle analisi di risposta sismica locale 1D e 2D. I litotipi differenziati da colori diverse nelle sezioni, sono stati suddivisi in differenti sismo strati, sulla base delle differenti proprietà fisico-meccaniche, desunte grazie alla campagna di indagine, illustrata nelle Tab. 1 e 2.

Le sezioni A-A', B-B' e C-C' sono illustrate in Fig. 2; esse, a seguito dell'espletamento della fase di validazione da parte del GdL, saranno utilizzate come input geologico-tecnico per la realizzazione delle analisi di risposta sismica locale 1D e 2D, necessarie per ottenere i fattori di amplificazione, così come previsto dagli ICMS (2008) per la microzonazione sismica di Livello 3.

L'analisi dei dati geologici *s.l.* pregressi ha consentito, quindi, d'individuare sia aree con assenza di indagini e, di conseguenza, sprovviste di caratterizzazione sismica dei terreni sia zone con presenza di aspetti geologico-tecnici ancora dubbi.

Si citano, ad esempio:

- l'estensione del contatto tettonico tra le Arenarie del Macigno e l'Unità di Canetolo, ben caratterizzato in corrispondenza della porzione settentrionale del terrazzo alluvionale (così come visibile in Fig. 1) e riportato in corrispondenza del settore NE della sezione A-A' in Fig. 3;
- il contatto tettonico tra Unità di Ottone ed Unità di Canetolo, desunto durante il rilievo di campagna, in corrispondenza della porzione NW del terrazzo alluvionale;
- la caratterizzazione geometrica e fisico-meccanica dell'esteso fenomeno gravitativo che interessa il versante ad E del centro abitato di Fivizzano. Nella ricostruzione preliminare del modello di sottosuolo viene proposta, sulla base delle risultanze del rilievo di campagna, della foto-interpretazione e dell'analisi dei logs dei sondaggi a carotaggio continuo eseguiti in corrispondenza dell'ospedale di Fivizzano, la distinzione in due livelli: uno superficiale ritenuto attivo e caratterizzato mediamente da caratteristiche fisico-meccaniche medio-basse ed uno inferiore, in roccia, considerato (anche sulla base delle notizie storiche dell'area) in uno stato di quiescenza e connotato da elevati valori in termini di Vs (mediamente >1500 m/s).

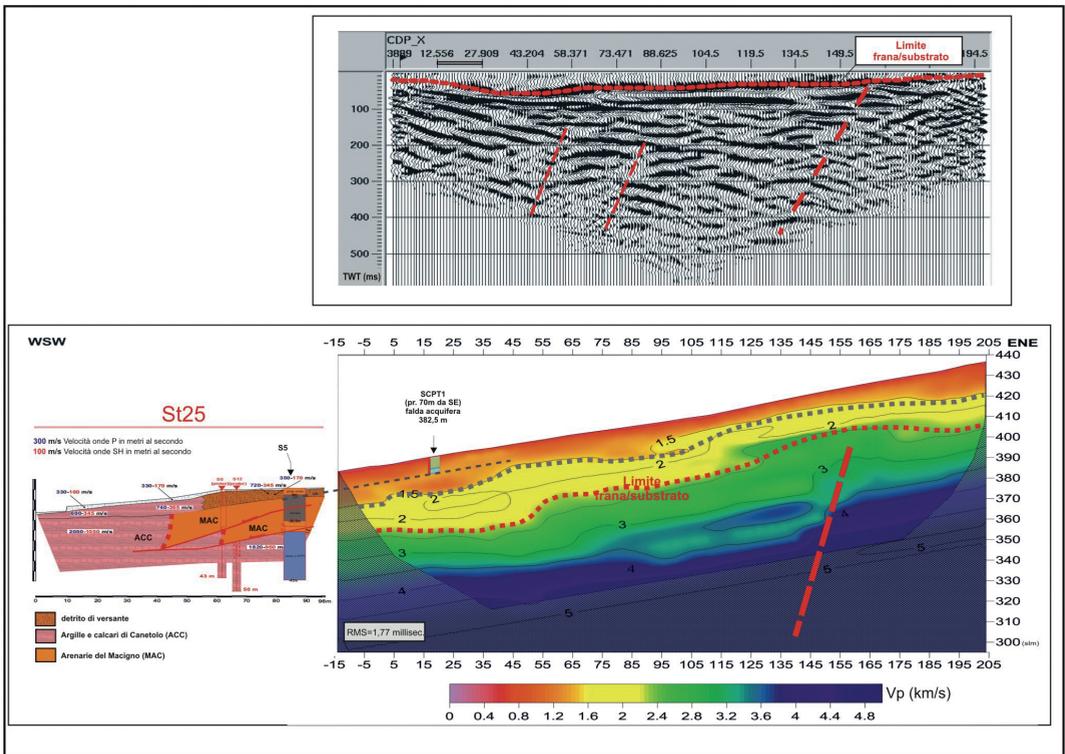


Fig. 3 – Modello bidimensionale del sottosuolo, ad est di Fivizzano, derivato dall'analisi congiunta dei nuovi dati geofisici (sezione di sismica a riflessione in onde P e tomografia sismica a rifrazione in onde P) e delle indagini pregresse (stesa sismica a rifrazione St25 e sondaggio geognostico S5, realizzati nel 2004 nell'ambito del Progetto VEL).

Pertanto, grazie al coinvolgimento di tre Istituti del CNR (IGAG di Roma, IMAA di Potenza e IAMC di Napoli) si è programmata una ulteriore campagna multidisciplinare di indagini geofisiche di superficie, il cui prospetto riassuntivo è visibile in Tab. 2.

Tab. 2 - Prospetto delle nuove indagini geofisiche realizzate nel centro abitato di Fivizzano (giugno 2013 e maggio 2014).

TIPOLOGIA INDAGINE	n°
Misure di rumore a stazione singola	24
Stendimenti di sismica passive in array (ESAC)	4
Tomografia elettrica (ERT)	4
Sismica a riflessione in onde P	4
Prove MASW	12
Sismica a rifrazione (tomografie in onde P)	4
TOTALE	52

La campagna di nuove indagini è stata realizzata prevalentemente nel maggio 2014 ed è consistita in indagini sismiche attive (sismica a rifrazione e riflessione in onde P e indagini MASW), prospezioni di sismica passiva in array (secondo la metodologia ESAC) ed a stazione singola (12 misure H/V a cui si devono aggiungere le 12 misure effettuate nell'estate 2013, a seguito dell'evento che ha interessato l'area di studio il 21 giugno 2013).

Infine, poiché sulla base delle indagini pregresse, in alcuni contesti, le formazioni geologiche oggetto d'indagine mostrano simili valori di velocità di propagazione delle onde sismiche (questo accade sia al contatto tra il livello inferiore dei depositi alluvionali terrazzati antichi e le sottostanti argilliti della Formazione delle Argille e Calcari di Canetolo, sia al contatto prevalentemente tettonico tra formazioni litoidi ascrivibili alle tre differenti Unità descritte nel precedente paragrafo), sono state eseguite quattro tomografie elettriche di resistività (ERT) da confrontarsi con le indagini di sismica attiva in riflessione e rifrazione.

A titolo d'esempio, viene riportata in Fig. 3 l'interpretazione preliminare del citato fenomeno gravitativo ad est del centro abitato, desunta dall'analisi congiunta dei nuovi dati geofisici (sezione di sismica a riflessione in onde P e tomografia sismica a rifrazione in onde P) e delle indagini pregresse (stesa sismica a rifrazione St25 e sondaggio geognostico S5, realizzati nel 2004 nell'ambito del Progetto VEL).

Le predette indagini, ancora in fase di validazione da parte del GdL, consentiranno di migliorare ulteriormente il modello geologico dell'area, confermando la preliminare ricostruzione del modello geologico-tecnico superficiale e sepolto (illustrata nelle Figg. 1 e 2), oppure apportando ad esso le necessarie variazioni.

Le future attività. Una volta definito il modello geologico-tecnico dell'area, il GdL provvederà alla realizzazione di analisi di risposta sismica locale in condizioni 1D e 2D. Tale confronto consentirà, oltre alla quantificazione dei fenomeni di amplificazione locale, l'individuazione dei principali fenomeni fisici responsabili delle modifiche del moto sismico.

L'input sismico da utilizzare sarà definito mediante differenti approcci. Lo spettro di riferimento al bedrock sarà definito con metodi probabilistici e deterministici e saranno applicati sia segnali artificiali che naturali. Tra questi ultimi si utilizzeranno, tra gli altri, gli accelerogrammi estratti mediante il codice di calcolo SCALCONA 2.0 (Rota *et al.*, 2012; Zuccolo *et al.*, 2014), sviluppato per la Regione Toscana dal Gruppo di ricerca dell'Università di Pavia nell'ambito di un apposito Accordo di Collaborazione Scientifica.

Si provvederà poi, in linea con quanto previsto dagli ICMS (2008), ad effettuare un'analisi quantitativa delle condizioni di stabilità in condizioni sismiche del fenomeno gravitativo,

ubicato nel settore orientale dell'area di studio.

Lo studio sarà, infine, corredato anche da una valutazione del peso delle varie incertezze, rilevate nelle varie fasi di analisi, sul risultato finale. In particolare per quanto riguarda la modellazione numerica è previsto l'utilizzo di differenti software di calcolo della risposta locale al fine di valutare l'incertezza associata ai diversi metodi e codici numerici.

Lo studio di microzonazione sismica del centro abitato di Fivizzano sarà redatto in conformità a quanto previsto dalle "Linee Guida Nazionali per la Microzonazione Sismica" (ICMS, 2008) e dagli "Standard di rappresentazione e di archiviazione informatica" prodotti dalla Commissione tecnica nazionale per la Microzonazione Sismica, recepiti nell'ambito della normativa regionale dalla Regione Toscana con Deliberazioni di Giunta Regionale (n.261/2011, n.741/2012, n.971/2013).

Nel prossimo periodo anche le principali frazioni del comune di Fivizzano saranno interessate da analisi di microzonazione sismica di Livello 1, realizzate (come da prassi in Regione Toscana) da tecnici incaricati e coordinati in corso d'opera dall'Ufficio Prevenzione sismica della Regione Toscana. Questa attività sarà finanziata mediante il cofinanziamento statale previsto dall'Ordinanza C.D.P.C. n. 52/2013.

Riconoscimenti. L'Ufficio Prevenzione sismica della Regione Toscana vuole ringraziare l'Arch. M. Ferrini, il Prof. P. Signanini, il Prof. M.L. Rainone, il Prof. C. Eva ed il Prof. D.C. Lo Presti, i quali hanno contribuito negli anni passati con la loro elevata competenza tecnico-scientifica alla definizione del modello geologico-tecnico dell'area del centro abitato di Fivizzano. Inoltre, un sentito ringraziamento va all'Amministrazione comunale di Fivizzano (MS), che ha sempre supportato con interesse e dedizione le tante attività di indagine, monitoraggio e studio effettuate sul proprio territorio, fornendo una preziosa assistenza tecnico-logistica.

Bibliografia

- 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.
- 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.
- Ferrini M., Baglione M., Calderini F., D'Intinosante V., Danise S., Di Lillo R., Fabbroni P., Galli 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.
- ICMS - Gruppo di lavoro MS; 2008: *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*, 3 vol. e DVD.
- Puccinelli A., D'Amato Avanzi G., Giannecchini R., Nannini D.; 2005): *Carta Geologica della Regione Toscana a scala 1:10.000: Sezione 234140 Fivizzano*. Regione Toscana, reperibile al sito <http://www.regione.toscana.it>.
- Puccinelli A., D'Amato Avanzi P., Perilli N.; 2010: *Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000: Foglio 234 Fivizzano e Note Illustrative*. ISPRA, in stampa, reperibile al sito http://www.isprambiente.gov.it/media/carg/234_Fivizzano/Foglio.html.
- 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.
- 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., Lai C.G.; 2014: *Selection of spectrum- and seismo-compatible accelerograms for the Tuscany region in Central Italy*. Soil Dynamics and EarthquakeEngineering 66 (2014) 305-313.