

Evento sismico del 06.04.2009 in Abruzzo: attività della Regione Toscana per la microzonazione sismica della conca aquilana

M. Baglione¹, V. D'Intinosante², P. Fabbroni³, F. Vannini⁴ ■

Sommario

A seguito del terribile evento sismico in Abruzzo del 6 Aprile 2009, il Settore Coordinamento Regionale Prevenzione sismica della Regione Toscana (di seguito denominato CRPS), è stato coinvolto dal Dip.to di Protezione Civile Nazionale (di seguito denominato DPC) nell'ambito delle attività geologiche di analisi e studio connesse con la Microzonazione Sismica della Conca Aquilana.

L'ufficio Rischio Sismico del DPC, coordinato dal Prof. Dolce, nel mese di Giugno u.s. ha coinvolto la Regione Toscana chiedendo ufficialmente,

con nota in data 03.06.09, la partecipazione dei Geologi Regionali del CRPS per la suddetta attività. In particolare al CRPS della Regione Toscana è stato quindi affidato dal DPC un ruolo di coordinamento generale nella realizzazione della microzonazione sismica della macroarea 9 comprendente alcune tra le località maggiormente danneggiate dall'evento sismico appartenenti al Comune dell'Aquila (Loc.tà di Pianola, Bagno Grande, Bagno Piccolo, Civita di Bagno, San Benedetto, Sant'Angelo e Vallesindola) e del Comune di Ocre (Loc.tà di San Felice d'Ocre, Valle d'Ocre e Cavalletto d'Ocre).

1. Introduzione

Il CPRS della Regione Toscana nel corso della realizzazione delle attività di microzonazione sismica dei suddetti territori ha potuto mettere a frutto l'esperienza decennale svolta in Toscana applicando la metodologia del Programma VEL (Ferrini et al., 1998; 2007) che per la prima volta è stata utilizzata in situazioni di emergenza e quindi in un contesto di ricostruzione post-evento e non di prevenzione sismica.

La metodologia utilizzata per lo studio di Microzonazione Sismica (di seguito denominato MS), in analogia a quanto viene realizzato nell'ambito del Programma VEL (Cherubini et al., 2006; D'Intinosante, 2003; Lo Presti et al., 2002; Petrini et al., 2000), ha permesso di acquisire un livello di conoscenza del sottosuolo particolarmente approfondito consentendo così il raggiungimento di una MS di livello 3, così come definita dagli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica" approvati recentemente dal DPC e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province autonome (Gruppo di lavoro MS, 2008).

Anche per quanto concerne le tipologie e le metodologie di indagine geologiche, geofisiche e geotecniche realizzate è stato fatto riferimento

alle specifiche tecniche inserite nel manuale delle Istruzioni Tecniche del Programma VEL (Ferrini et al., 1998), recentemente ed interamente confluite negli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica" che sono state utilizzate a livello nazionale e che saranno applicate nei prossimi anni anche da tutte le Regioni.

Tutte le attività di MS sono state realizzate in collaborazione con varie strutture collegate al mondo professionale, universitario ed agli Enti Locali, coinvolte a vario titolo e in relazione alle proprie specifiche competenze. Nello specifico le attività che sono state svolte ed i soggetti coinvolti sono di seguito riportati:

- a. Task 1 – Reperimento dati pregressi e dati di base esistenti: Regione Toscana.
- b. Task 2 – Rilievi Geologici: Regione Toscana, Università di Firenze (Dip.to di Scienze della Terra), Università di Pisa (Dip.to di Scienze della Terra). Per ognuna delle aree, selezionate sulla base della perimetrazione fornita dal DPC, sono stati eseguiti opportuni rilevamenti geo-litologici e geomorfologici di campagna in scala 1:5000 in un intorno significativo dei vari centri abitati selezionati per un totale di circa 350ha.

¹ Regione Toscana, Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica, Genio Civile di Firenze - ✉ massimo.baglione@regione.toscana.it.

² Regione Toscana, Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica, Genio Civile di Firenze - ✉ vittorio.dintinosante@regione.toscana.it.

³ Regione Toscana, Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica, Genio Civile di Firenze - ✉ pierangelo.fabbroni@regione.toscana.it.

⁴ Regione Toscana, Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica, Genio Civile di Firenze - ✉ francesco.vannini@regione.toscana.it.

- c. Task 3 – Geofisica: Università di Chieti (CERS-GEO), Provincia Autonoma di Trento, Impresa Geoprove s.a.s. di Lucca. È stata effettuata, a seguito dei rilievi geologici, una campagna di indagini geofisiche di superficie, in grado di fornire una parametrizzazione mono e bidimensionale geometrica e fisico-meccanica in campo dinamico, finalizzata all'estensione nel sottosuolo delle conoscenze di superficie, nei limiti intrinseci della metodologia e connessi alla logistica delle aree indagate. Nello specifico sono state eseguite due successive campagne di sismica a rifrazione con onde P e SH per complessivi 15 stendimenti e per un totale di 1620 ml. Tali indagini sono state poi opportunamente integrate con prove passive tipo ReMi (42 verticali di misura) e prove tipo MASW (13 verticali di misura). Le indagini geofisiche in situ sono state svolte da fine giugno ai primi di agosto 2009;
- d. Task 4 – Misure Strumentali: Università di Firenze. È stata realizzata con n. 7 stazioni sismiche a larga banda per ogni area in modo da poter acquisire contemporaneamente dati sismici (sia rumore ambientale che terremoti locali) in un intervallo di tempo di 24 ore per ogni località. Le attività, realizzate nel mese di giugno 2009, hanno permesso di stimare il periodo fondamentale di risonanza del terreno e poter fornire una preliminare valutazione dei fattori di amplificazione mediante il metodo dei rapporti spettrali H/Href;
- e. Task 5 – Geotecnica e Geofisica in foro: Regione Toscana, Impresa Geo s.a.s. dell'Aquila, Università di Pisa (Dip.to di Ingegneria Civile), C.G.G. srl di Bologna, CNR-IAMC di Napoli. Sulla base dei risultati delle indagini sismiche di superficie, sono state realizzate indagini di dettaglio, consistite in 8 sondaggi geognostici (con prelievo di campioni per l'esecuzione di prove geotecniche di laboratorio in campo statico e dinamico) e relative prove down-hole, per una migliore e puntuale definizione del profilo sismostratigrafico (Foti et al., 2002);
- f. Task 6 – Definizione del Modello di sottosuolo: Regione Toscana. Una volta realizzate tutte le indagini geologiche, geofisiche e geotecniche, si è proceduto, per ogni area, ad omogeneizzare tutti i dati al fine di poter definire in maniera attendibile un quadro completo del sottosuolo descritto attraverso una serie di sezioni geologico-tecniche rappresentative sia in termini di spessori che in termini di parametri dinamici, utilizzabili come input geologico-tecnico in fase di modellazione.
- g. Task 7 – Simulazioni numeriche: Dipartimento della Protezione Civile.
- h. Task 8 – Report finali: Regione Toscana. A conclusione di tutto il lavoro è stata realizzata una relazione tecnica finale descrittiva della metodologia e delle procedure utilizzate e di commento sui risultati prodotti. Inoltre sono state prodotte cartografie geologiche delle aree, carte delle indagini, carte delle isopache, sezioni geologico-tecniche di sottosuolo, e carte di microzonazione di livello 1 e di livello 3. Inoltre si è curato l'aspetto connesso con la diffusione dei dati attraverso la pubblicazione dei risultati prodotti sul sito web regionale.

2. Considerazioni sulle attività realizzate e risultati prodotti

L'esperienza realizzata in Abruzzo è stata certamente molto interessante dal punto di vista tecnico-scientifico in quanto ha permesso l'applicazione, in un contesto geologico differente da quello toscano, delle medesime metodologie utilizzate ad oggi in Toscana con ottimi risultati sia in termini di applicabilità che in termini di qualità del dato.

I rilievi geologici, realizzati ad hoc e ad una scala di estremo dettaglio (1:5.000) hanno fornito un ottimo supporto sia per la definizione delle problematiche e per guidare la programmazione delle indagini, sia per la determinazione del modello geologico di sottosuolo ed infine per l'estensione areale dei risultati per lo più puntuali delle analisi numeriche. Tale attività

è risultata di basilare importanza, in quanto le cartografie geologiche esistenti, redatte ad una scala di minor dettaglio e con finalità diverse da quelle del presente lavoro, sono risultate spesso inadeguate ai fini della microzonazione sismica, rendendo necessarie in taluni casi sostanziali modifiche. Le maggiori discrepanze si sono riscontrate soprattutto in corrispondenza dei centri abitati, dove solitamente la geologia di superficie risulta mascherata dal tessuto urbano. In particolare, le preesistenti cartografie geologiche, sia quella dell'abitato di Valle che quella del centro storico di San Felice d'Ocre mostrano la presenza di situazioni diverse da quelle effettivamente osservate nel rilievo eseguito. La frazione di Valle ad esempio, insiste su substrato calcareo, mentre le vecchie cartografie indicano la presenza di sedimenti alluvionali.

Per quanto concerne San Felice d'Ocre, invece, nonostante le vecchie cartografie geologiche riportino la presenza di substrato calcareo e la morfologia della dorsale sulla quale si sviluppa il paese di San Felice possa far ipotizzare la presenza di substrato subaffiorante, l'assenza di significativi affioramenti, e le testimonianze degli abitanti, relative al mancato rinvenimento di roccia in occasione dell'apertura di scavi per la posa in opera di sottoservizi, ci hanno spinto a realizzare una campagna di indagine (sondaggio a c.c. di 30 m di profondità) in corrispondenza del centro storico del paese, mediante la quale è stato possibile individuare la presenza di depositi fluvio-lacustri per almeno 30 m. La correttezza dei modelli geologici così definiti, trova inoltre conferma nella diversa risposta sismica locale desumibile dalle misure strumentali e nei diversi livelli di danneggiamento riscontrati. A fronte di tipologie costruttive del tutto simili infatti, il centro storico di Valle, posto su substrato calcareo non ha subito particolari danneggiamenti, mentre il centro storico di San Felice d'Ocre, poggiante su depositi fluvio-lacustri, ha riportato livelli di danneggiamento molto più elevati.

La successiva caratterizzazione geofisica dei terreni, basata esclusivamente sulle nuove indagini realizzate, vista la totale mancanza di dati ed informazioni preesistenti, ha permesso una adeguata parametrizzazione dinamica dei terreni attraverso la stima del profilo delle Vs in alcune verticali note e la definizione di una velocità media delle onde di taglio per ogni formazione presente. La prima fase di caratterizzazione geofisica dei siti oggetto di studio è stata condotta mediante l'utilizzo di differenti tecniche geofisiche di superficie, sia di sismica attiva sia di sismica passiva. Questo step di indagine del sottosuolo è stato necessario (alla luce anche della decennale esperienza maturata nell'ambito del Progetto VEL in Toscana) al fine di maturare le informazioni sull'assetto sepolto utili per una buona programmazione delle indagini geotecniche e geofisiche in foro (Rainone et al., 2003).

In questo contesto le indagini geofisiche di sismica a rifrazione con onde P e SH (Barsanti et al., 2000; Rainone et al., 2007) hanno fornito una buona applicabilità per la stima delle Vs e per la ricostruzione bidimensionale del sottosuolo in tutti i contesti in cui sono state realizzate, sia in quelle in cui è presente un forte contrasto di velocità tra le coperture e il bedrock sismico, sia in quelle in cui il probabile bedrock si trovava a profondità elevate. Inoltre, la non trascurabile eterogeneità nell'assetto sepolto ha

previsto, nella maggior parte dei casi, una più attenta interpretazione manuale rispetto ai metodi automatici disponibili.

Le indagini in foro di tipo down-hole hanno confermato le informazioni sismostratigrafiche desunte dalle indagini geofisiche di superficie, realizzate nella precedente fase di indagine multidisciplinare, sia per quanto riguarda gli spessori dei litotipi sepolti, sia per quanto concerne il valore delle velocità sismiche rilevate. In generale si può affermare come la correlazione tra indagini sismiche a rifrazione e la sismica in foro fornisca un quadro omogeneo in termini di ricostruzione sismostratigrafica, fermo restando le naturali differenze dovute alle diverse tipologie d'indagine.

Per quanto concerne le misure passive di tipo ReMi eseguite nei centri abitati oggetto del presente studio, è possibile concludere che, sulla base dei risultati prodotti e del confronto con le altre tecniche, tale indagine, in linea con il suo principale limite metodologico, tenda a sottostimare anche fortemente i valori di Vs desunti, soprattutto per quanto concerne i sismostrati ascrivibili al substrato sismico. Ciò appare evidente dal confronto con le indagini di sismica attiva (sismica a rifrazione e MASW) e con le indagini down-hole. Del resto la scelta di affiancare, nell'ultima fase di misure, alla classica acquisizione passiva della tecnica ReMi analisi di sismica attiva secondo il metodo MASW, derivava proprio dalla necessità di confermare la sottostima in termini di Vs della prova passiva e valutarne l'entità. A titolo d'esempio si può osservare nella Figura 1 il confronto tra i profili di Vs desunti da prove ReMi e MASW, realizzate nella medesima area in cui si può verificare una discreta correlazione in termini di spessori ma una non trascurabile sottostima delle Vs del substrato sismico (nell'area caratterizzato dall'Unità Arenaceo-Pelittica UAP_b) da parte dell'indagine ReMi. I valori di Vs desunti dalle prove Masw sono confermati invece sia dalle prove down-hole sia dalle due stese sismiche a rifrazione realizzate.

Dalle suddette considerazioni deriva la maggiore problematica, peraltro spesso ribadita dagli scriventi nell'ambito di incontri e convegni, nell'utilizzo delle prove ReMi per la stima della Vs, soprattutto in ambito progettuale; di contro tale tecnica ha potuto fornire una discreta definizione degli spessori delle coperture sismiche, come è stato possibile desumere dal confronto con i risultati delle perforazioni effettuate.

Le misure strumentali di tipo sismometrico (Figura 2) condotte parallelamente all'esecuzione della campagna geofisica di superficie, in analogia a quanto viene fatto in Toscana nell'ambito del Pro-

gramma VEL (Ferrini M. et al., 1998; D'Intinosante et al., 2007), hanno fornito informazioni fondamentali soprattutto per la fase di indirizzo degli

approfondimenti di indagini successive sostituendosi spesso in termini di utilizzo alla carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (carta

Figura 1
Confronto tra i profili di Vs desunti da prove ReMi e Masw nel sito di Bagno.

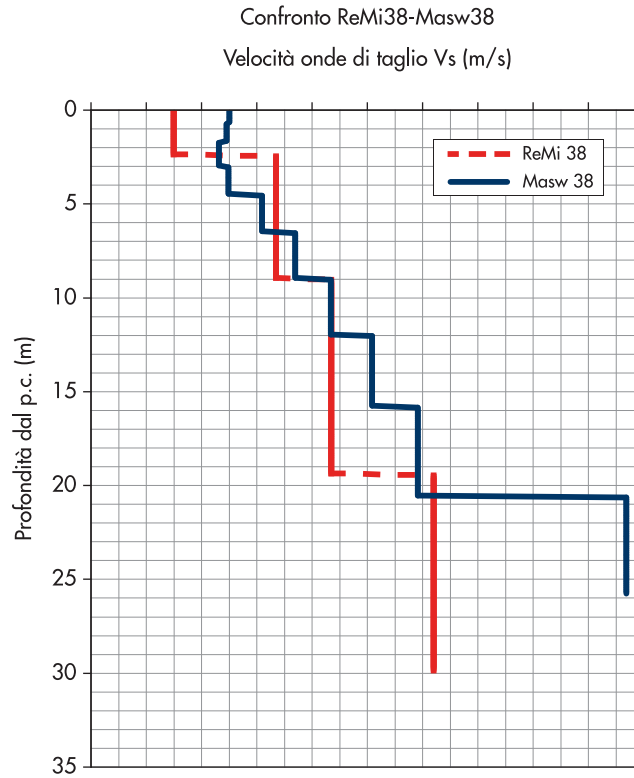
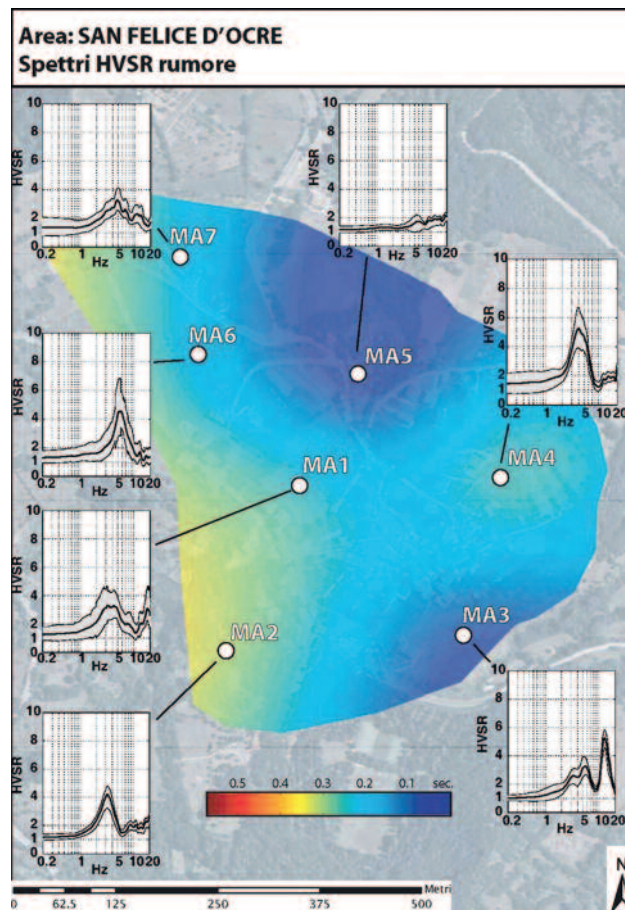


Figura 2
Mappa dei periodi di risonanza nel sito di S. Felice d'Ocre.



di livello 1, vedi Figura 3) che invece (se è basata sui pochi e scarsi dati esistenti a disposizione) non può fornire informazioni attendibili sugli spessori delle coperture presenti e sulla definizione delle zone stabili, così come definite dagli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica".

La definizione del modello geologico-tecnico di sottosuolo, realizzata a valle di tutte le indagini geologiche, geofisiche e geotecniche, è stata un'attività onerosa in termini di tempo e soprattutto estremamente critica. Infatti, è sempre neces-

sario procedere ad una fase di omogeneizzazione, confronto ed integrazione di tutti i dati a disposizione al fine di pervenire ad un modello di sottosuolo coerente. Tale fase rappresenta, forse, il momento più delicato di tutto lo studio di microzonazione, sia perché coinvolge più soggetti, sia perché durante la fase di omogeneizzazione e di creazione del modello devono essere fatte opportune valutazioni tenendo conto del differente livello di incertezza attribuito ai diversi parametri desunti da differenti indagini. Inoltre, in moltissime situazioni è stata necessaria una completa

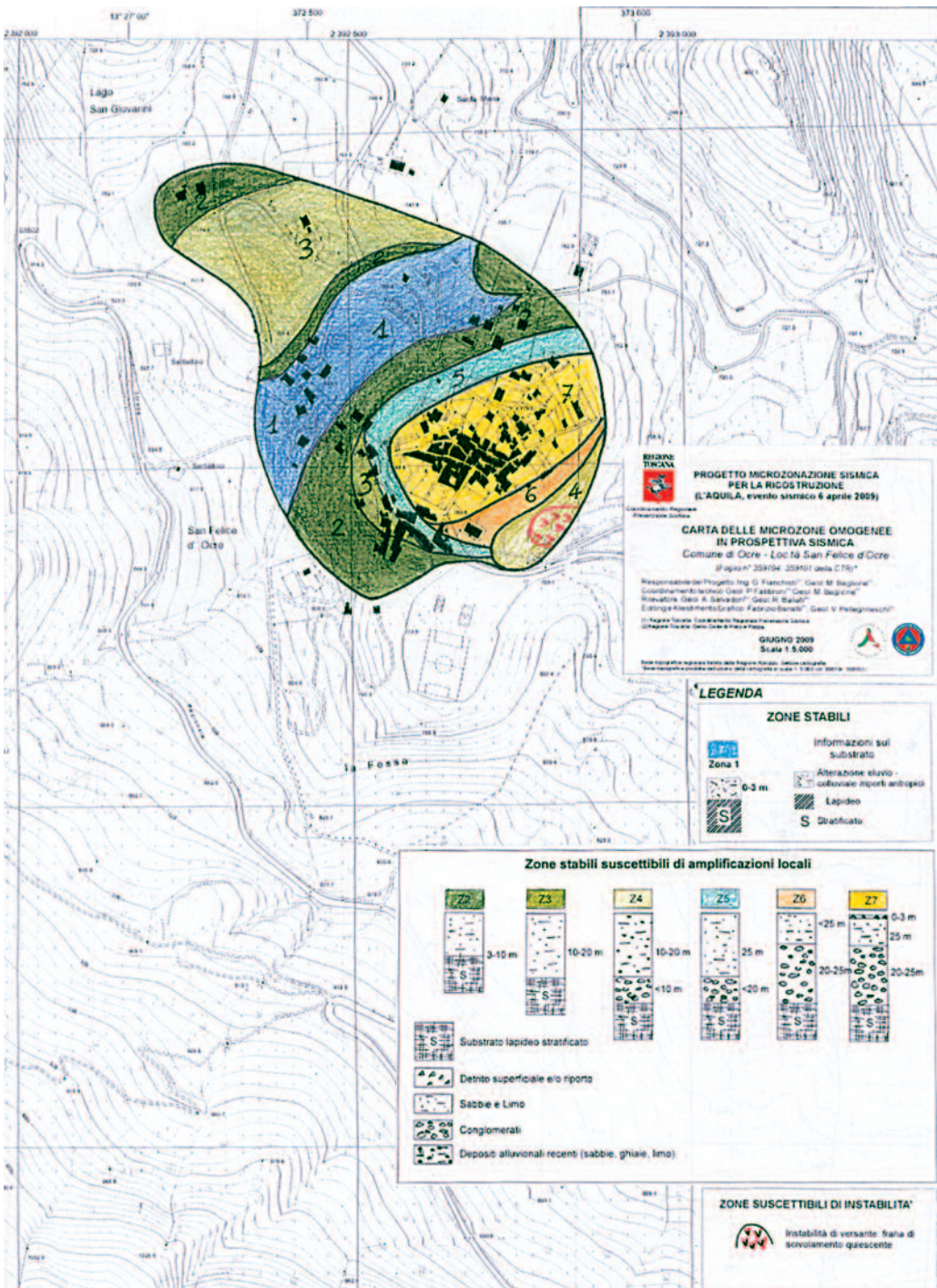


Figura 3
 Carta delle Microzone Omogenee in prospettiva sismica (livello I) di S. Felice d'Ocre.

revisione del modello geologico di partenza (essenzialmente di superficie) e ciò ha comportato spesso un notevole cambiamento del modello stesso rispetto a quello desumibile dalle cartografie delle microzone omogenee in prospettiva sismica del livello 1. Tale situazione è naturale e direttamente consequenziale con la logica del maggiore approfondimento dei livelli 2 e 3 rispetto al precedente livello 1, proprio in relazione alla realizzazione di indagini di sottosuolo che permettono di individuare un assetto sepolto che spesso è anche molto diverso rispetto a quello interpretato dai soli rilievi di superficie eventualmente integrati con i dati di base disponibili. Nella realizzazione delle sezioni per la modellazione (Figura 4), come già detto, sono stati utilizzati tutti i dati a disposizione partendo dai rilievi geologici di superficie che hanno guidato la definizione del modello geologico ed integrando tali informazioni con i dati diretti forniti dai sondaggi geognostici e con i dati indiretti forniti dalle proiezioni geofisiche di superficie (sismica a rifrazione, prove MASW e prove ReMi) e in foro (prove down-hole). Tra le indagini geofisiche, in questa fase di integrazione dei dati sono state utilizzate le prove ReMi quasi esclusivamente per la determinazione degli spessori delle coperture sismiche a causa della sottostima in termini di Vs. Le mappe di frequenza sono state utilizzate, laddove il modello sismostratigrafico lo permetteva, per l'integrazione con i dati di Vs acquisiti nella campagna geofisica e con i dati stratigrafici desunti dai sondaggi, al fine di fornire un maggior numero di stime sulla profondità del substrato sismico per la realizzazione delle sezioni geologico-tecniche fornite come input geologico per la modellazione 2D. In molti casi, però, il picco di risonanza corrispondeva a contrasti all'interno delle coperture sismiche, vanificando per tali scopi l'utilizzo del dato strumentale.

Unitamente alle sezioni geologico-tecniche di sottosuolo sono state realizzate anche cartografie delle isopache delle coperture (Figura 5) in cui gli spessori evidenziati si riferiscono generalmente al contatto tra coperture sismiche e il bedrock sismico dell'area.

La ricostruzione del modello geologico-tecnico del sottosuolo ha fornito quindi i dati per l'esecuzione delle analisi di risposta sismica locale, effettuate dal Dipartimento della Protezione Civile Nazionale.

Per quanto concerne la definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento prope-
deutici alla analisi di risposta sismica locale sono state utilizzate le specifiche e le indicazioni fornite dal G.d.L. (Albarello et al., 2009) costituito ad hoc

dal DPC per analizzare criticamente gli elementi della pericolosità di base e definire le caratteristiche degli eventi di riferimento da utilizzare come input nelle simulazioni numeriche per la microzonazione sismica dell'area colpita dal terremoto del 6 Aprile 2009. Tali indicazioni sono state sviluppate applicando, più in generale, i criteri delle Linee Guida Nazionali per la Microzonazione Sismica. Nell'ambito del citato studio sono stati selezionati quattro siti considerati rappresentativi di tutte le aree oggetto dello studio della microzonazione (tra cui anche la Macroarea 9) e per queste sono stati ottenuti i risultati per le simulazioni numeriche in termini di spettri di risposta elastici e accelerogrammi, utilizzando due diversi approcci:

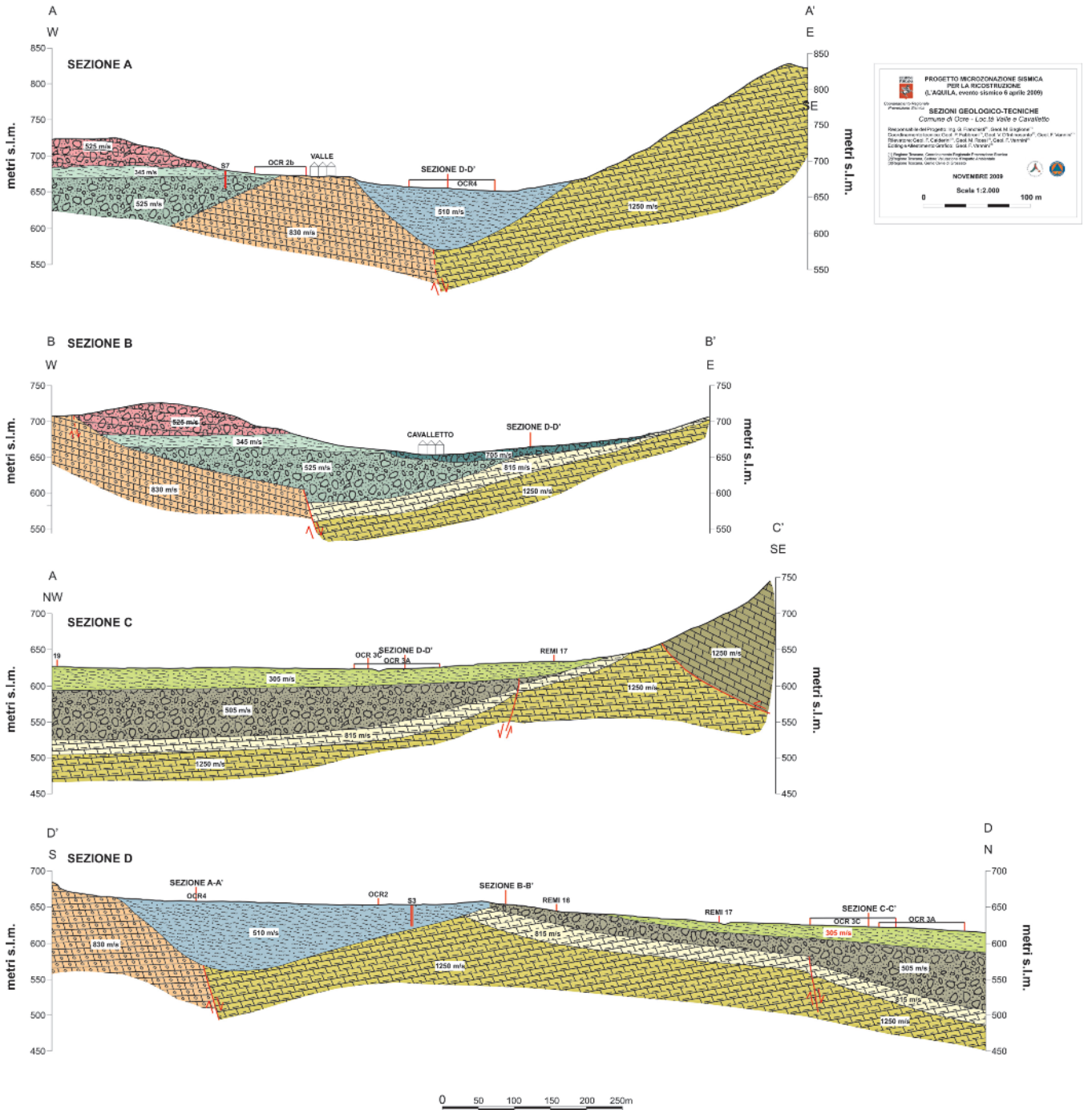
- a. un approccio probabilistico basato su di una valutazione della pericolosità sismica dell'area aquilana, aggiornata con i più recenti sviluppi metodologici che ha portato alla definizione di uno spettro a pericolosità uniforme;
- b. un approccio deterministico basato sull'individuazione di un terremoto di scenario, ricavato dalla disaggregazione della pericolosità, dalle storie sismiche al sito ricostruite da dati macrosismici e dalle registrazioni acquisite durante la recente sequenza sismica, che ha portato alla definizione di spettri ed accelerogrammi ricavati da relazioni di attenuazione del moto del terreno.

Per la selezione del moto input da utilizzare nelle simulazioni numeriche per la microzonazione sismica, sono stati individuati come input da utilizzare nelle simulazioni numeriche per la microzonazione sismica, sempre sulla base degli approcci considerati e descritti più ampiamente nello studio sopraccitato (Albarello et al., 2009), tre diversi spettri riportati in Figura 6:

1. Spettro UHS della normativa NTC-08 (D.M.14.1.2008) calcolato in base ai parametri a_g , F_0 , T^*_C che risultano uguali per i 4 siti considerati rappresentativi delle aree oggetto di studio.
2. Spettro deterministico ottenuto dalla relazione di attenuazione SP96, per una coppia di magnitudo e distanza ($M_w = 6.7$, $R_{epi} = 10$ km) ricavata dalle analisi di disaggregazione (Albarello et al., 2009). Anche in questo caso non si rilevano differenze significative per i siti oggetto di studio.
3. Spettro UHS ottenuto in base all'analisi di pericolosità, con il modello LADE1 e l'attenuazione SP96, per il sito di Goriano Sicoli (Albarello et al., 2009). Ancora una volta non si rilevano differenze significative negli spettri probabilistici ottenuti per i 4 siti oggetto di studio.

MODELLO GEOLOGICO DEL SOTTOSUOLO: SEZIONI GEOLOGICO-TECNICHE
 Comune di Ocre - località Valle e Cavalletto
 scala originaria 1:2000

Figura 4
 Sezioni geologico-tecniche
 per il sito di Valle e
 Cavalletto.



**PROGETTO MICROZONAZIONE SISMICA
 PER LA RICOSTRUZIONE
 DELL'AQUILA, evento sismico 6 aprile 2009**

Comune di Ocre
 Provincia di Pescara

SEZIONI GEOLOGICO-TECNICHE
 Comune di Ocre - Loc. Valle e Cavalletto

Realizzato da: Ing. Roberto Di Stefano
 Direzione Provinciale di Ocre - P. P. 100 - Ocre (P. Pescara)
 Relatore: G. Di Stefano - G. Di Stefano - G. Di Stefano - G. Di Stefano
 Edizione: Novembre 2009

NOVEMBRE 2009
 Scala 1:2.000

0 100 m

- Depositi alluvionali - riempimento dolina (b_{III}); Vs media = 510m/s
- Depositi di conoide alluvionale fini - Cavalletto Nord (m); Vs media = 305m/s
- Depositi di conoide alluvionale grossolani - Cavalletto Nord (m); Vs media = 505m/s
- Depositi di conoide alluvionale grossolani - Cavalletto (m); Vs media = 705m/s
- Depositi fluvio-lacustri fini (AP); Vs media = 345m/s
- Depositi fluvio-lacustri grossolani (AP); Vs media = 525m/s
- Depositi fluvio-lacustri grossolani (ACT); Vs media = 525m/s
- Marne calcaree - litofacies calcareo-marnosa alterata (UAM); Vs media = 815m/s
- Marne calcaree - litofacies calcareo-marnosa (UAM); Vs media = 1250m/s
- Calcari a briozoi e litotamni (CBZ); Vs media = 1250m/s
- Calcari a coralli e diceratidi (CCD); Vs media = 1250m/s

- sez a-a' intersezione con altra sezione geologico-technica
- S3 sondaggio geognostico
- sovrascorrimento
- OCR 3A sismica a rifrazione in onde P ed SH
- REMI 17 indagine ReMi
- faglia diretta

Figura 5
Carta delle isopache del substrato sismico per il sito di San Felice d'Ocre.

Per quanto riguarda le analisi numeriche, è stato fatto riferimento ancora una volta alle indicazioni presenti nelle Linee Guida Nazionali e alle speci-

fiche fornite dal G.d.L. costituito ad hoc dal DPC (Lanzo et al., 2009) relativamente alle metodologie e ai codici di calcolo per le analisi numeriche.

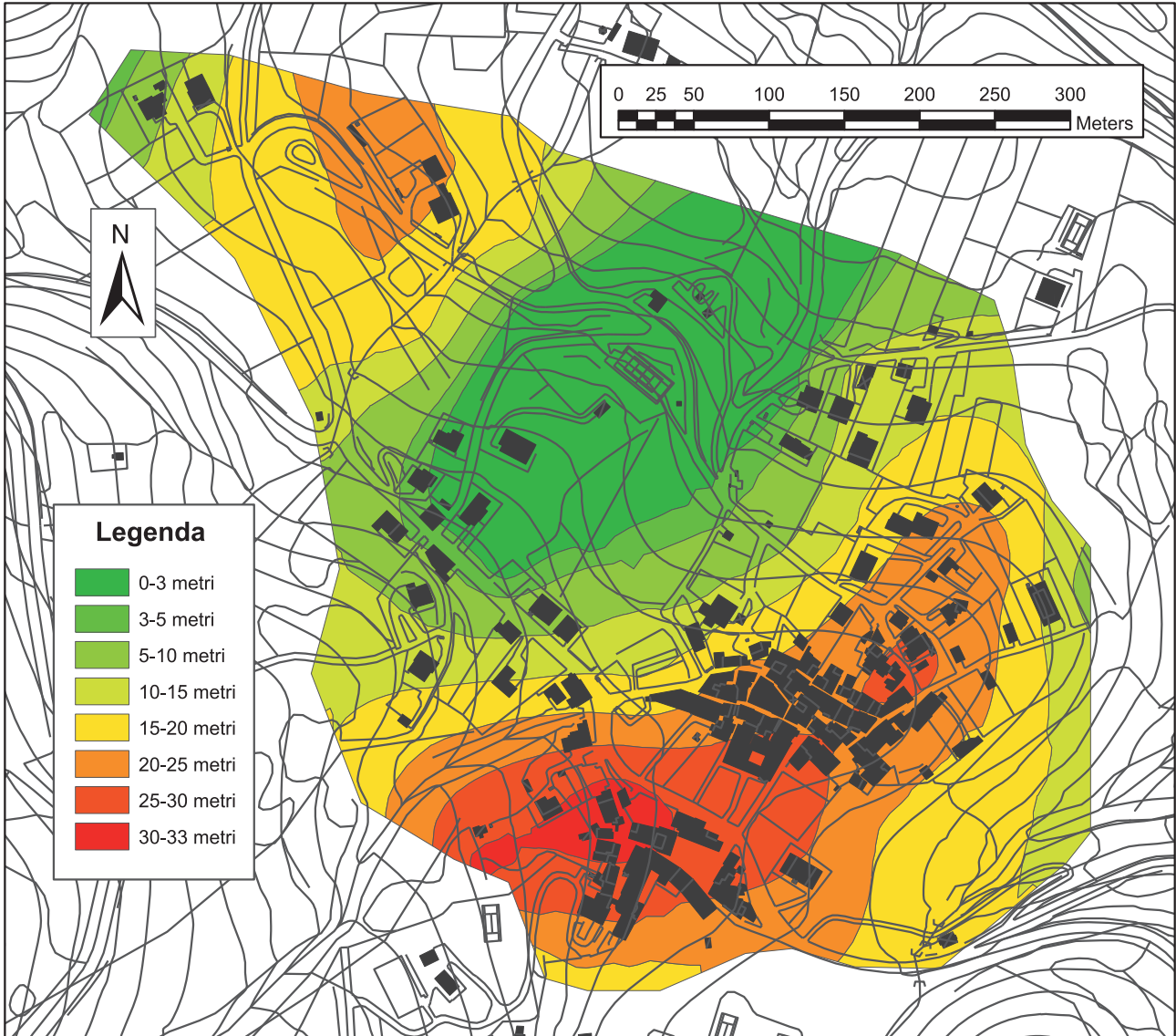
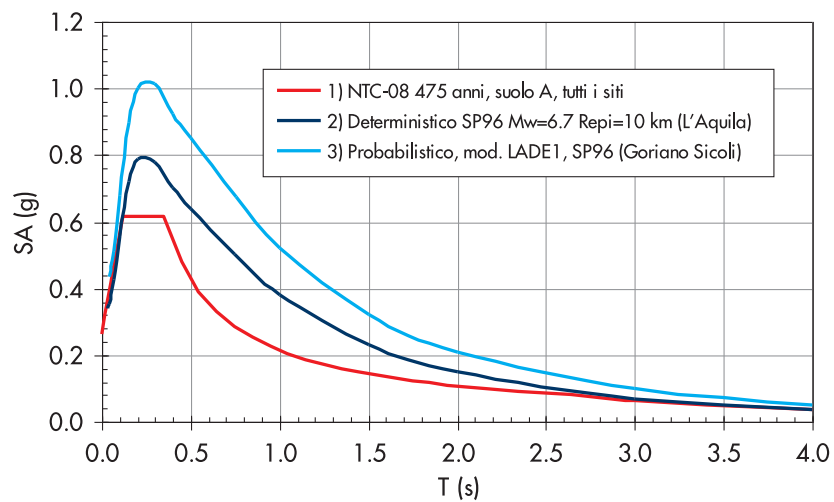


Figura 6
Spettri selezionati per l'input sismico ai fini della microzonazione nell'area aquilana. Da Albarello et al. (2009).



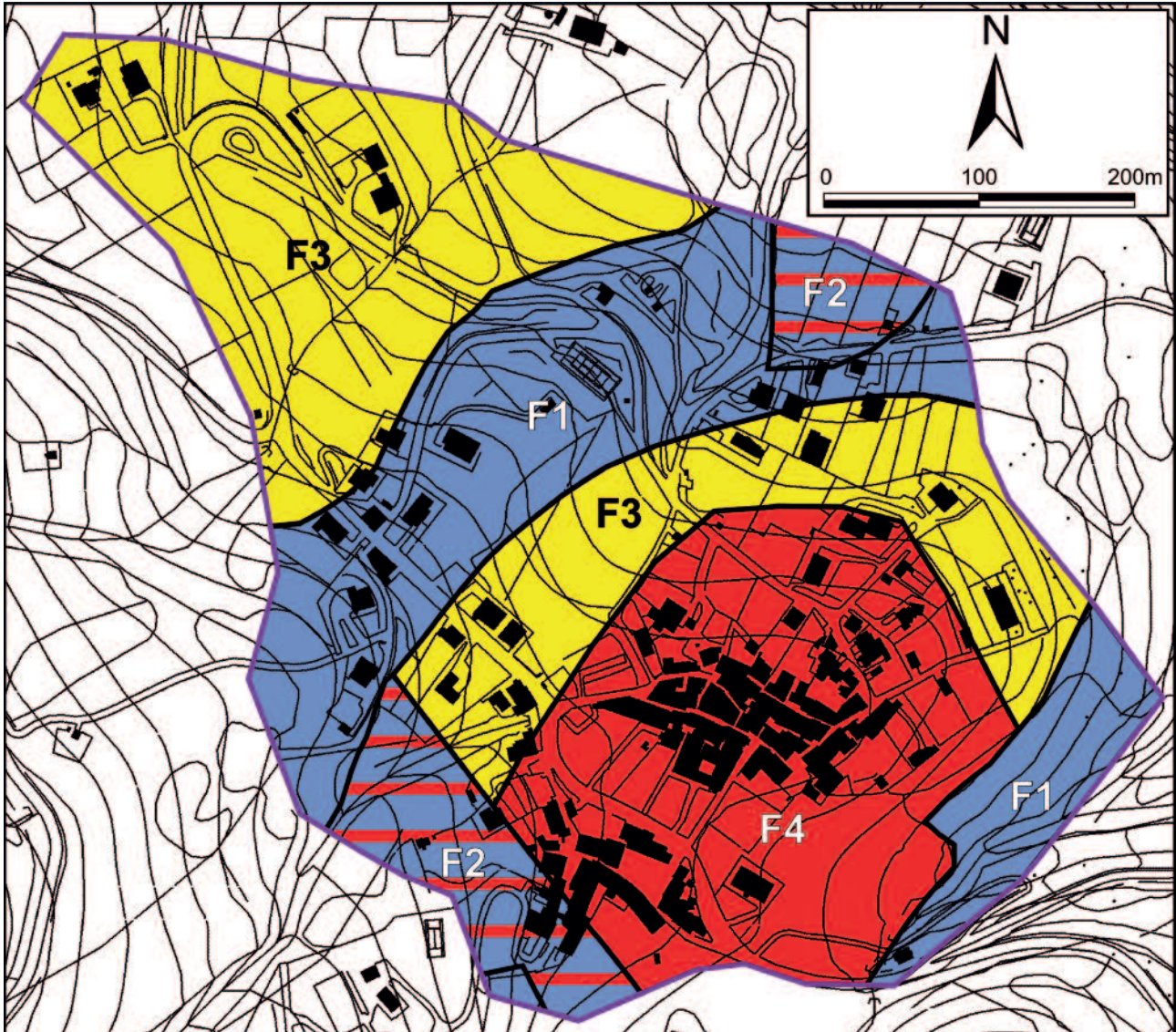
È opportuno precisare che i codici di calcolo disponibili differiscono principalmente per la geometria del problema, le ipotesi semplificative adottate per la schematizzazione del comportamento dei materiali, le modalità di applicazione dell'input sismico, l'algoritmo di calcolo e le condizioni al contorno. La scelta di un adeguato codice di calcolo non è operazione semplice essendo funzione, oltre che della affidabilità del programma, delle caratteristiche del sito in studio e delle conoscenze a disposizione (geologiche, geofisiche, geotecniche e sismiche). Pertanto un giusto equilibrio tra il grado di approfondimento delle analisi di risposta sismica locale e delle indagini geologiche, geotecniche e geofisiche, e il tipo di codice utilizzato è fondamentale per ottenere risultati realistici e affidabili. Un altro aspetto di primaria importanza per la scelta del codice di calcolo riguarda il modello costitutivo adottato per i materiali. Tutti i programmi di calcolo richiedono come moto di input uno spettro di risposta o un accelerogramma, considerato come un'onda piana nell'ipotesi di sorgente molto lontana rispetto al sito di analisi (condizioni far-field). Una volta predisposte le varie fasi preliminari alle analisi di risposta locale (cioè definizione del modello di sottosuolo, definizione dell'input sismico e scelta del codice di calcolo) è opportuno, ove possibile, validare il modello di sottosuolo mediante il confronto tra i risultati calcolati mediante analisi numerica e quelli sperimentali ottenute da misure sismometriche, disponibili o effettuate ad hoc nell'area di studio.

I codici di calcolo sopra descritti sono stati applicati ai modelli di sottosuolo individuati, considerando come input sismico un accelerogramma compatibile con lo spettro derivante dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC-08).





È stato preso in considerazione un solo moto di input su roccia affiorante, cioè quello della normativa corrispondente ad un periodo di ritorno di 475 anni. Nello specifico il citato GdL ha ritenuto di utilizzare un accelerogramma artificiale basato sulla modifica di un accelerogramma naturale (nel caso specifico quello registrato alla stazione AQV) in modo da poter essere ritenuto compatibile con quanto previsto dalle NTC08. La scelta è dovuta al fatto che, tra i tre proposti: normativa, deterministico e probabilistico, rappresenta l'input di minore intensità e quindi quello che produce la maggiore amplificazione. È opportuno precisare che le NTC al par. 3.2.3.6 ammettono anche l'uso di accelerogrammi artificiali, escludendoli tuttavia per analisi dinamiche di opere e dei sistemi geotecnici. Nelle Linee Guida Nazionali per la Microzonazione Sismica

(par. 2.5.3.1.1) non viene fornita un'indicazione vincolante in tal senso. La ragione di questo è connessa con il campo di applicazione degli studi di microzonazione sismica, direttamente applicabili alla fase pianificatoria e non alla progettazione diretta delle opere che prevede un'analisi puntuale, mentre in fase di microzonazione sismica viene generalmente effettuata un'analisi areale in cui le variabilità delle caratteristiche meccaniche del terreno risultano maggiori.

Gli spettri sono stati convertiti in accelerogrammi prima di essere utilizzati nelle analisi di amplificazione locale. I risultati sono stati espressi in termini di fattori di amplificazione quali: FA e FV, così come definiti dagli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica, 2008". Per tutte tali aree si è preferito ricorrere a valori medi delle Vs, in considerazione della non capillare distribuzione delle indagini geofisiche. Infatti nei siti dov'era possibile tarare le prove ReMi con prove di sismica attiva ci si è accorti (Figura 1) della non trascurabile sottostima nella definizione dei profili di Vs, tali da sconsigliarne l'utilizzo. Nei casi dove l'unico dato disponibile era quello delle prove ReMi si è preferito dedurre valori medi al fine di mitigare statisticamente l'errore associato alle prove di rumore. Per questi motivi tutte le analisi di amplificazione locale sono naturalmente affette da incertezza. Tutte le sezioni geologico-tecniche sono state analizzate sia con analisi monodimensionali mediante il programma di calcolo SHAKE91 (Idriss e Sun, 1992) sia mediante analisi 2D con BESOIL (Sanò, 1996) nel caso di evidenti discontinuità laterali. In tal maniera le sezioni stesse sono state divise in segmenti a pericolosità uniforme. Sulla base di tali suddivisioni si è poi passati all'estensione areale dei risultati facendo riferimento al contesto geologico e stratigrafico dei vari centri abitati, pervenendo così alla perimetrazione di aree omogenee distinte sulla base delle coppie di valori FA e FV. In Figura 7 è presentata una carta di microzonazione sismica di livello 3 (così come definite dagli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica, 2008") riferita al centro abitato di San Felice d'Ocre. Per l'area di San Felice d'Ocre vengono distinte, sulla base delle suindicate analisi, zone stabili e due aree stabili soggette ad amplificazione (caratterizzate da differenti valori dei parametri FA ed FV). Preme sottolineare come alcune aree (indicate nelle carte da sfondo blu con rigatura rossa) presentino coperture sismiche che, in virtù dei limitati spessori desunti, non hanno prodotto amplificazioni significative, a seguito delle modellazioni numeriche. Tali situazioni, qualora le aree siano inte-




PROGETTO MICROZONAZIONE SISMICA PER LA RICOSTRUZIONE (L'AQUILA, evento sismico 6 aprile 2009)
 Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica
MACROAREA N°9
CARTA DI MICROZONAZIONE SISMICA (livello 3)
 Comune di Ocre (AQ) - Località San Felice d'Ocre
 Responsabile del Progetto: Ing. G. Fianchisti⁽¹⁾, Geol. M. Baglione⁽¹⁾
 Coordinamento tecnico: Geol. P. Fabbroni⁽¹⁾, Geol. V. D'Intinosante⁽¹⁾, Geol. F. Vannini⁽¹⁾
 Analisi numeriche: Ing. Tito Sarò⁽²⁾
 Editing e Allestimento Grafico: Geol. V. D'Intinosante⁽¹⁾
 (1) Regione Toscana, Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica
 (2) Consulente Dipartimento Protezione Civile Nazionale
 
GENNAIO 2010

| ZONE STABILI | | | |
|--|---------|---------|---|
| F1  | FA 1 | FV 1 | |
| F2  | FA 1 | FV 1 | L'area F2 presenta coperture di natura detritica ed eluvio-colluviale che, in virtù dei limitati spessori desunti, non hanno prodotto amplificazioni significative, a seguito delle modellazioni numeriche. Tali situazioni, qualora le aree siano interessate da interventi edilizi, vanno doverosamente verificate mediante idonee campagne di indagine, al fine di accertare l'effettivo spessore delle coperture. |
| ZONE STABILI SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI | | | |
| ZONA | FA | FV | |
| F3  | 1.6 | 2.0 | |
| F4  | 1.7 | 1.2 | |


 area d'indagine

Figura 7
 Carta di Microzonazione Sismica (livello III) di S. Felice d'Ocre.

ressate da interventi edilizi, vanno doverosamente verificate mediante idonee campagne di indagine, al fine di accertare l'effettivo spessore delle coperture. Inoltre, i fenomeni gravitativi attivi e/o quiescenti presenti in altre aree oggetto di studio sono stati identificati qualitati-

3. Conclusioni

L'esperienza svolta in Abruzzo nell'ambito del progetto di MS è da considerarsi proficua perché è stato possibile applicare in tempi ridottissimi le tecniche di indagine e le metodologie di analisi che sono state messe a punto negli anni in Toscana. I risultati sono stati soddisfacenti perché hanno totalmente confermato che le scelte metodologiche fatte a suo tempo in Toscana trovano applicabilità anche in contesti geologici differenti e quindi sono estendibili in molteplici situazioni. Le cartografie prodotte nei livelli di approfondimento 1 e 3 necessitano però di una lettura critica in termini di attendibilità dei risultati. Le cartografie di Livello 1 (Figura 3) partono dal presupposto che sulla base del rilievo di superficie (casomai coadiuvato da indagini pregresse, che molto spesso sono carenti, non disponibili o di livello qualitativo molto scadente) si possano identificare aree a comportamento sismico omogeneo. Tale presupposto può essere valido come guida a successivi approfondimenti solo per modelli geologici del sottosuolo molto semplici (condizione che, perlomeno su territorio regionale, è molto rara). In altri casi, la successiva campagna di indagini può portare spesso allo stravolgimento dei modelli precostituiti e di conseguenza alle cartografie qualitative prodotte nella prima fase. Infine, la realizzazione di cartografie di livello 3 (il

vamente a seguito del rilievo geologico di campagna e lo studio multitemporale delle foto aeree relative all'area in esame. La conferma dello stato di attività e la caratterizzazione dei relativi parametri quantitativi necessiterà di ulteriori fasi d'indagine e monitoraggio.

massimo previsto dalle Linee Guida nazionali) consente sicuramente un non trascurabile miglioramento delle conoscenze sulla risposta sismica dei terreni proporzionale al grado di qualità e dettaglio delle indagini di esplorazione del sottosuolo. Di contro, l'errore insito nella caratterizzazione dei terreni, la necessità di provvedere all'estensione areale dei dati acquisiti, l'approssimazione insita sia nella scelta dei terremoti di input sia negli algoritmi di ognuno dei codici di calcolo, consiglia l'utilizzo delle mappe di microzonazione sismica come elemento di conoscenza del territorio ai soli fini urbanistici, naturale ambito di applicazione delle stesse. Invece, l'adempimento di studi inerenti la progettazione ai sensi del DM 2008 deve prevedere doverosamente caratterizzazioni ed analisi specifiche per il sito d'indagine, in cui la cartografia di Livello 3 può porsi al limite come strumento di indirizzo.

La documentazione tecnica completa e la cartografia relativa allo studio di Microzonazione Sismica della Conca Aquilana è possibile visionarla al seguente indirizzo web: www.protezionecivile.it e limitatamente alla Macroarea 9 anche al seguente sito del CRPS della Regione Toscana: www.rete.toscana.it/sett/pta/sismica/index.shtml

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare tutto il Gruppo di Lavoro della Macroarea 9 costituito dai seguenti tecnici, ognuno per le rispettive competenze:

- per i rilievi geologici dell'area: G. Principi¹, A. Puccinelli², G. D'Amato-Avanzi², F. Menna¹, R. Gianecchini², D. Marchetti², A. Salvetti², G. Turrini², A. Salvadori³, R. Ballati³, F. Calderini⁴, M. Rossi⁵;
- per le indagini geofisiche: A. Franceschini⁶, P.

- Barsanti⁷, P. Signanini⁸, M. Rainone⁸, F. Pizzica⁸;
- per le indagini geotecniche: D. Lo Presti⁹, N. Squeglia⁹, P. Cortopassi¹⁰, F. Milano¹⁰;
- per le misure strumentali: M. Rippepe¹, E. Marchetti¹, D. Delle Donne¹, G. De Rosa¹, G. La Canna¹, R. Genco¹, L. Colò¹;
- per le simulazioni numeriche: T. Sanò¹¹;
- per gli aspetti di editing, informatizzazione e allestimento grafico: V. Pellegrineschi³, F. Benelli¹².

¹ Università di Firenze, Dipartimento di Scienze della Terra

² Università di Pisa, Dipartimento di Scienze della Terra

³ Regione Toscana, Genio Civile di Pistoia

⁴ Regione Toscana, Ufficio VIA

⁵ Regione Toscana, Genio Civile di Grosseto

⁶ Provincia Autonoma di Trento, Servizio Geologico

⁷ Impresa Geoprove s.a.s. di Lucca

⁸ Università di Chieti, CERS-GEO

⁹ Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Civile

¹⁰ Regione Toscana, Genio Civile di Massa

¹¹ Consulente DPC, Roma

¹² Regione Toscana, Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica

Bibliografia

- AA. VV. (1987) - *Progetto Terremoto in Garfagnana e Lunigiana*. Consiglio Nazionale delle Ricerche (GNDR) e Regione Toscana. Edizioni "La Mandragora", Firenze.
- Albarelo D., Boncio P., Galli P., Messina P., Pace B., Peruzza L., Sabetta F., Sanò T., Visini F. (2009) - *Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento*. Rapporto tecnico per il GdL "Microzonazione Sismica della Conca Aquilana".
- Barsanti P., D'Intinosante V., Ferrini M., Signanini P. (2000) - *Note sulla sismica a rifrazione con onde di taglio per la caratterizzazione sismica dei terreni*. Atti del XIX Convegno Nazionale GNGTS, Roma.
- 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 Licciana 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.
- D'Intinosante V., Ferrini M., Eva C., Ferretti G. (2007) - *Valutazione degli effetti di sito mediante l'utilizzo di rumore ambientale in alcuni siti ad elevata sismicità della Toscana Settentrionale (Garfagnana e Lunigiana)*. XII Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia", Pisa 10-14 giugno 2007.
- Ferrini M. et al. (1998) - *Istruzioni Tecniche per le indagini geologiche, geofisiche, geognostiche e geotecniche per la valutazione degli effetti locali nei comuni classificati sismica della Toscana (delibera di G.R.T. n.1629 del 28.12.1998)*
- Ferrini M. et al. (1998) - *Delibera di G.R.T. n.1209 del 19.10.98 e successive modificazioni ed integrazioni - Approvazione del "Programma Regionale per la Valutazione degli effetti locali VEL"*.
- 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.
- Foti S., Lo Presti D., Pallara O., Rainone M.L., Signanini P. (2002) - *Indagini geotecniche e geofisiche per la caratterizzazione del sito di Castelnuovo Garfagnana (Lucca)*. Rivista Italiana di Geotecnica, Luglio - Settembre (2002).
- Gruppo di Lavoro MS (2008) - *Indirizzi e criteri per la micro zonazione sismica*. Conferenza delle Regioni e delle Province autonome - Dipartimento della protezione civile, Roma, 3 vol. e Cd-rom.
- Idriss I.M., Sun J.I. (1992) - *SHAKE91: A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits*. User's Guide, University of California, Davis, California, 13 pp.
- Lanzo G., Martino S., Pergalani F., Pugliese A., Sanò T. (2009) - *Metodologie e codici per le analisi numeriche*. Rapporto tecnico per il GdL "Microzonazione Sismica della Conca Aquilana".
- Lo Presti D., Luzi L., Pergalani F., Petri V., Puci I., Signanini P. (2002) - *Determinazione della risposta sismica dei terreni a Castelnuovo Garfagnana (Lucca)*. Rivista Italiana di Geotecnica, Luglio - Settembre 2002.
- Petri V., Pergalani F., Luzi L., Lo Presti D., Puci I., Signanini P. (2000) - *Determinazione della risposta sismica dei terreni a Castelnuovo Garfagnana (LU)*. Rivista Italiana di Geotecnica.
- Rainone M.L., Signanini P., Pizzica F., Madonna R., Torrese P., D'Intinosante V., Ferrini M. (2007) - *Applicabilità delle tecniche di sismica a rifrazione in onde SH per la valutazione della risposta sismica locale*. XII Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia", Pisa 10-14 giugno 2007.
- Rainone M.L., Signanini P., D'Intinosante V. (2003) - *Metodi geofisici integrati per la ricostruzione del sottosuolo e per la caratterizzazione dinamica dei terreni negli studi di microzonazione sismica: l'esempio di Pieve Fosciana (LU)*. Quaderni di Geologia Applicata, 10 (1). pp. 75-88.
- Sanò T. (1996) - *BESOL: un programma per il calcolo della propagazione delle onde sismiche*. Rapporto tecnico SSN/RT/96/9.