

## 3.2 La microzonazione sismica per la ricostruzione nell'area aquilana: risultati preliminari\*

M. Dolce<sup>1-2</sup> e G. Naso<sup>2</sup> ■

### 3.2.1 Introduzione

L'osservazione dei danni alle costruzioni e alle infrastrutture spesso evidenzia differenze sostanziali anche a piccole distanze oppure crolli e danni notevoli anche a grandi distanze dall'epicentro. Esempi di questo tipo si riscontrano all'interno della città de L'Aquila oppure in alcuni comuni anche distanti, come a S. Pio delle Camere, nella frazione di Castelnuovo. Sicuramente la qualità delle costruzioni può influire sulle differenze del danno, ma spesso le cause vanno ricercate in una differente pericolosità sismica locale, determinata da effetti di amplificazione del moto sismico o da instabilità del suolo. Tutto ciò è oggetto degli studi di Microzonazione Sismica (MS), attraverso i quali è possibile individuare e caratterizzare le zone stabili, le zone stabili suscettibili di amplificazione locale e le zone soggette a instabilità, quali frane, rotture della superficie per faglie e liquefazioni dinamiche del terreno.

Le problematiche trattate dagli studi di MS hanno avuto un forte sviluppo a livello scientifico negli ultimi 40 anni, anche se la loro importanza era emersa già in epoca passata. È da tempo noto che le condizioni locali dei terreni di fondazione condizionano in modo importante gli effetti del terremoto. Già un secolo fa i criteri informativi delle Norme Tecniche approvate con regio decreto 18 aprile 1909, n. 193, a seguito del disastroso terremoto di Messina e Reggio Calabria del 1908, riportavano il divieto di nuove costruzioni e ricostruzioni *"su terreni posti sopra e presso fratture, franosi o atti comunque a scoscendere, od a comunicare ai fabbricati vibrazioni e sollecitazioni tumultuarie per differente costituzione geologica o diversa resistenza delle singole parti di essi"*.

In uno studio condotto nel 1969 da alcuni studiosi americani in occasione del terremoto di S. Francisco del 1957, emersero risultati che indicavano con evidenza come nell'ambito della stessa città, a poche centinaia di metri di distanza, lo stesso terremoto provocasse scuotimenti decisamente differenti in dipendenza degli spessori e delle caratteristiche dei terreni più soffici presenti negli

strati più superficiali. Da allora gli studi su molti terremoti (es. Città del Messico, Messico 1986; Kobe, Giappone 1992; Izmit, Turchia 1999, San Giuliano di Puglia, Italia 2002) hanno mostrato con sempre maggiore evidenza come le caratteristiche locali del territorio possano alterare in maniera evidente l'azione sismica.

Gli studi di MS hanno l'obiettivo di razionalizzare la conoscenza di questi fenomeni restituendo informazioni utili per il governo del territorio, per la progettazione, per la pianificazione per l'emergenza e per la ricostruzione post sisma.

Nella pianificazione territoriale, in funzione delle varie scale e dei vari livelli di intervento, gli studi di MS sono condotti su quelle aree per le quali le condizioni normative consentono o prevedono l'uso a scopo edificatorio o per infrastrutture, o la loro potenziale trasformazione a tali fini, o prevedono l'uso ai fini di protezione civile.

Gli studi di MS sono di fondamentale importanza nella pianificazione al fine di:

- orientare la scelta di aree per nuovi insediamenti;
- definire gli interventi ammissibili in una data area;
- programmare le indagini e i livelli di approfondimento;
- stabilire orientamenti e modalità di intervento nelle aree urbanizzate;
- definire priorità di intervento.

Nella pianificazione d'emergenza sia di livello comunale che provinciale, gli studi di MS consentono una migliore e consapevole individuazione degli elementi strategici di un piano di emergenza ed in generale delle risorse di protezione civile.

La conoscenza dei possibili effetti locali indotti da un evento sismico su un territorio contribuisce a:

- scegliere aree e strutture di emergenza ed edifici strategici in zone stabili;
- individuare i tratti "critici" delle infrastrutture viarie e di servizio e le opere rilevanti, in caso di collasso, per le quali potrebbero essere necessarie specifiche valutazioni di sicurezza.

Nella fase della ricostruzione la MS contribuisce a:

<sup>1</sup> DPC - Dipartimento della Protezione Civile, Roma. [www.protezionecivile.it](http://www.protezionecivile.it)

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi di Napoli Federico II. [www.unina.it](http://www.unina.it)

\* I dati, le elaborazioni e i risultati, riportati nell'articolo, sono tratti dallo studio di microzonazione sismica del Gruppo di lavoro MS\_Aq, coordinato dal Dipartimento della Protezione Civile.

- scegliere le aree per le abitazioni temporanee;
- fornisce elementi ai tecnici e amministratori, sull'opportunità di ricostruire gli edifici non agibili;
- contribuisce a scegliere nuove aree edificabili.

Nella progettazione di opere nuove o di interventi su opere esistenti, gli studi di MS evidenziano l'importanza di fenomeni quali le possibili amplificazioni dello scuotimento legate alle caratteristiche litostratigrafiche e morfologiche dell'area e dei fenomeni di instabilità e deformazione permanente attivati dal sisma. Gli studi di MS, quindi, possono offrire elementi conoscitivi utili per la progettazione di opere, con differente incisività in dipendenza del livello di approfondimento e delle caratteristiche delle opere stesse. La realizzazione di uno studio di MS è uno strumento conoscitivo dalle diverse potenzialità, che ha costi differenziati in funzione del livello di approfondimento. Al momento di decidere l'esecuzione e il livello dello studio, occorre tener presente l'utilità che da esso può derivare, in modo da compararla con i costi da affrontare. Il miglioramento della conoscenza prodotto dagli studi di MS può contribuire concretamente, insieme a studi di vulnerabi-

lità ed esposizione, all'ottimizzazione delle risorse rese disponibili per interventi mirati alla mitigazione del rischio sismico.

In funzione dei diversi contesti e dei diversi obiettivi gli studi di MS possono essere effettuati a vari livelli di approfondimento, con complessità ed impegno crescenti, passando dal livello 1 fino al livello 3:

- il livello 1 è un livello propedeutico ai veri e propri studi di MS, in quanto consiste in una raccolta di dati preesistenti, elaborati per suddividere il territorio in microzone qualitativamente omogenee
- il livello 2 introduce l'elemento quantitativo associato alle zone omogenee, utilizzando ulteriori e mirate indagini, ove necessarie, e definisce una vera carta di MS
- il livello 3 restituisce una carta di MS con approfondimenti su tematiche o aree particolari.

Le modalità tecniche di esecuzione e di applicazione della MS sul territorio italiano sono definite 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).

### 3.2.2 La MS dell'area aquilana

Per la ricostruzione in Abruzzo, basandosi sui suddetti indirizzi, si è realizzata una MS di livello 2-3, per i Comuni che hanno subito un'intensità macrosismica di almeno VII MCS.

L'operazione ha visto il coinvolgimento di circa 150 ricercatori e tecnici di 9 Università italiane (L'Aquila, Chieti-Pescara, Genova, Politecnico Torino, Firenze, Basilicata, Roma1, Roma3, Siena), di 8 istituti di ricerca (CNR, INGV, AGI, RELUIS, ISPRA, ENEA, OGS, GFZ-Postdam), di 4 Regioni e 1 Provincia autonoma (Abruzzo, Lazio, Emilia-Romagna, Toscana, Provincia di Trento). Il coordinamento del gruppo di lavoro (Gruppo di lavoro MS\_Aq) è affidato al Dipartimento della Protezione Civile.

I lavori sono stati organizzati in 10 *task* tematici.

*Task 1:* Reperimento, archiviazione e restituzione informatica dati pregressi.

Sono stati raccolti, organizzati e informatizzati circa 300 log litostratigrafici corredati da dati geognostici in situ (SPT, CPT, ecc.). È stato costruito un sistema informativo che attraverso uno strumento WebGis sarà messo a disposizione della Regione Abruzzo per utilizzi connessi alla futura gestione del territorio.

*Task 2:* Definizione del modello geologico-tecnico del sottosuolo e fenomeni cosismici. Per ogni area interessata alla MS è

stato condotto un rilievo geologico tecnico e sono state prodotte carte alla scala 1:5000 e una serie di sezioni rappresentative. In queste carte sono segnalate anche le principali deformazioni cosismiche (rottture di faglie in superficie, frane sismoindotte, cedimenti differenziali; Figg. 1 e 2).

*Task 3:* Caratterizzazione geotecnica dei terreni. Sono stati perforati circa 100 sondaggi nei quali sono state condotte analisi geognostiche in situ e prelevati campioni indisturbati per analisi di laboratorio (caratteristiche fisiche e dinamiche).

*Task 4:* Caratterizzazione geofisica dei terreni. In tutti i sondaggi perforati è stata condotta un'analisi sismica (down hole). In tutti i siti sono state condotte analisi di sismica a rifrazione, indagini MASW, indagini Re.Mi. e acquisizioni geoleitriche.

*Task 5:* Analisi strumentali del *mainshock*, degli *aftershock* e dei microtremiti.

In tutti i siti sono state posizionati subito dopo l'evento principale array di stazioni accelerometriche e sono state condotte analisi di rumore con tromometri digitali portatili.

*Task 6:* Determinazione del terremoto di riferi-

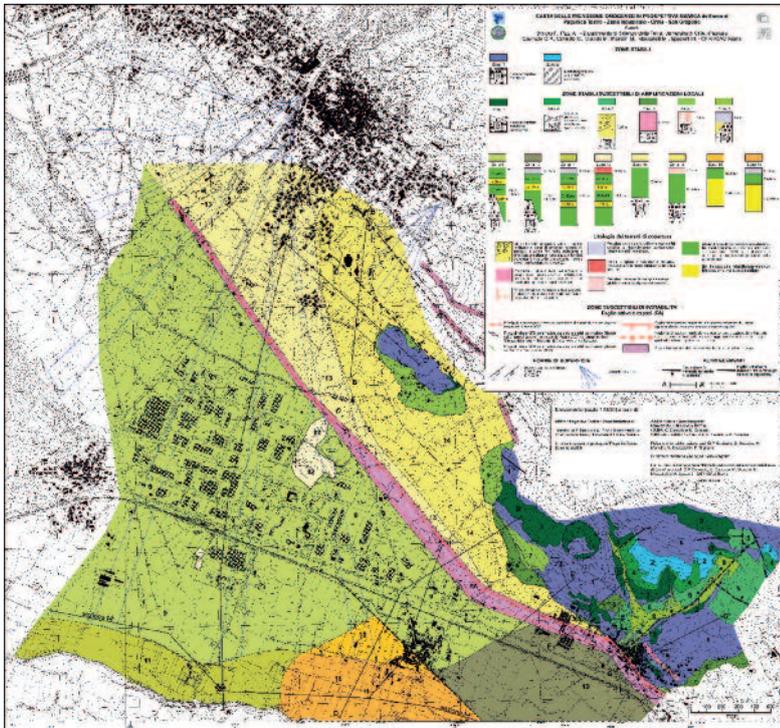


Fig. 1  
Esempio di carta geologico-  
tecnica. Area di Paganica-  
San Gregorio. In rosso, con  
direzione NW-SE traccia in  
superficie della faglia attiva,  
(Gruppo di lavoro MS\_aq;  
rilievi dell' Università di  
Chieti e del CNR-IGAG).

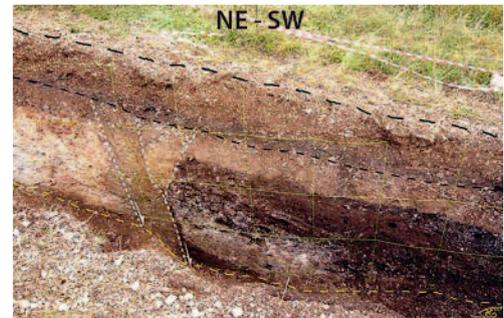


Fig. 2  
Trincea paleosismologica  
con evidenze della faglia  
attivata durante l'evento del  
6 aprile 2009. (Gruppo di  
lavoro MS\_aq; indagini del  
Dipartimento della  
protezione Civile e del  
CNR-IGAG).

mento per le simulazioni numeriche. Sulla base di dati sismotettonici, di sismicità storica e di accelerometria sono stati determinati alcuni input sismici per le simulazioni numeriche.

Le analisi condotte per la caratterizzazione dell'input sismico si possono dividere in tre tipologie:

- approccio basato sull'impiego dei dati macrosismici per l'individuazione di coppie magnitudo/distanza;
- definizione di spettri a pericolosità uniforme, ricavati da una valutazione probabilistica di pericolosità sismica dipendente dal tempo e valutando il potenziale sismogenetico delle faglie presenti nell'area;
- analisi degli spettri registrati durante il *mainshock* del 6 aprile.

**Task 7:** Simulazioni numeriche.

Sulla scorta dei dati geologici, geotecnici e geofisici raccolti, si sono approntate per ogni macroarea una serie di sezioni litotecniche 1D e 2D che sono state analizzate con simulazioni numeriche operate con codici diversi scelti in funzione degli assetti geologico-tecnici

rappresentati nelle sezioni.

**Task 8:** Analisi del danno.

In alcune aree (Onna e San Gregorio, frazioni de L'Aquila) è stata condotta un'analisi del danno, corredata da una dettagliata analisi della vulnerabilità degli edifici.

**Task 9:** Raccordo con Pianificazione Urbastica e Norme Tecniche Costruzioni.

Le aree rilevate per gli studi di MS sono state definite in accordo con gli Amministratori e Tecnici comunali, identificando le problematiche urbanistiche locali. Sono stati raccolti e informatizzati tutti i piani regolatori; le tavole principali di questi ultimi sono state sovrapposte alle carte di MS di livello 1. Sia gli input che gli spettri ottenuti in superficie con le simulazioni numeriche sono stati confrontati con quelli proposti nelle NTC, 2009.

**Task 10:** Produzione di report, cartografie e diffusione dati. I dati di base e i risultati saranno riportati in un volume in un DVD, in fase di completamento. Come già riportato un WebGis sarà a disposizione nel sito della Regione Abruzzo.

### 3.2.3 Sintetica descrizione di alcuni risultati preliminari

Per ogni area indagata sono state definite una serie di risultati cartografici e numerici.

I risultati cartografici sono riassunti in tre carte:

- una carta di MS di livello 1;
- una carta di MS di livello 2 o 3 (Gruppo di lavoro MS, 2008), nella quale ogni zona è caratterizzata da uno spettro elastico di risposta;

- una carta dei periodi fondamentali di vibrazione.

La carta di livello 1 (Fig. 3) è stata utilizzata in una prima fase, per l'identificazione delle aree in cui stanno sorgendo i villaggi provvisori (case monopiano in legno) e i moduli provvisori per uso scolastico; in una seconda fase queste stesse carte sono a disposizione per la pianificazione urbanistica post evento.

Dal punto di vista strettamente tecnico, queste carte permettono di identificare le aree che, per problematiche geologiche e geotecniche, devono essere assolutamente escluse dalla progettazione di qualsiasi opera antropica.

Un buon esempio di queste situazioni può essere la cartografia dell'abitato di San Gregorio, che è interessato dall'emergenza in superficie della faglia responsabile dell'evento del 6 aprile 2009. Intorno alla traccia in superficie è stata definita un'area di rispetto (15+15 m), all'interno della quale le Autorità politico-amministrative si sono riservate di decidere su opportune prescrizioni. Lo stesso genere di problema si è presentato per l'area di Stiffe, dove aree di rispetto sono state create intorno a una serie di frane che si sono attivate durante l'evento sismico.

Nella città de L'Aquila (parte meridionale) sono state invece evidenziate aree di cedimenti differenziali (fondazioni poggianti in parte sulle "megabrecce" e in parte su terreni con scarsa rigidità, riempimento di antichi piccoli corsi d'acqua) e aree di scoscendimenti e smottamenti lungo le scarpate che limitano a sud la città.

Le carte di livello 2 e 3 e i risultati numerici sono un supporto per i progettisti che dovranno occuparsi della ricostruzione degli edifici danneggiati. Si riportano, come esempio, i risultati dell'area di Castelnuovo e di Onna.

Il centro abitato di Castelnuovo è situato su una collina costituita da limi argillosi e sabbie più o meno cementate (Fig. 4). Lo spessore dei limi è di circa 80-90 m, al di sotto dei limi è presente il substrato calcareo. Il paese che ha subito un forte danneggiamento, classificato come IX

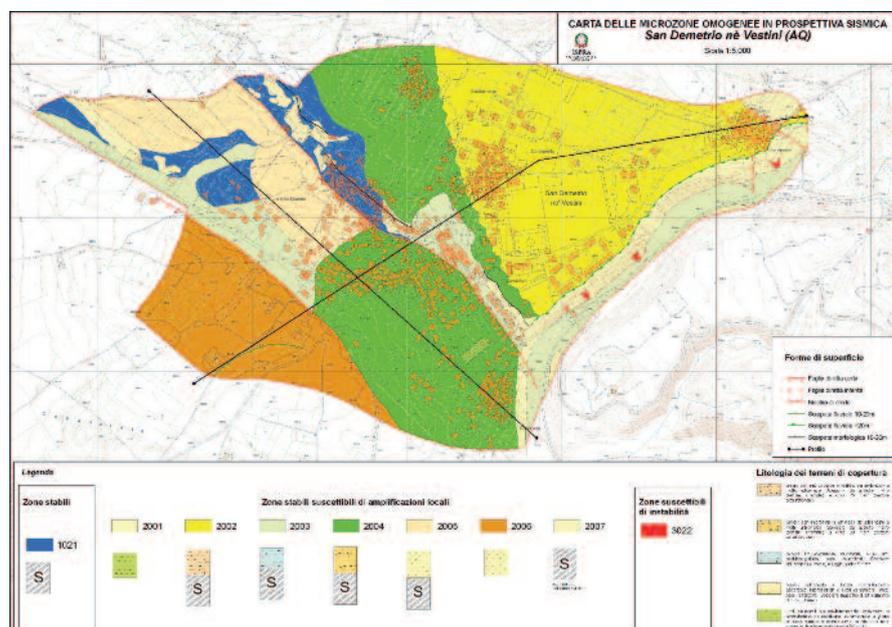
grado della scala Mercalli-Cancani- Sieberg, mentre i paesi limitrofi non superano il VII grado. Sono state perimetrare aree in cui cedimenti differenziali sono stati provocati dai crolli dovuti a cavità sotterranee.

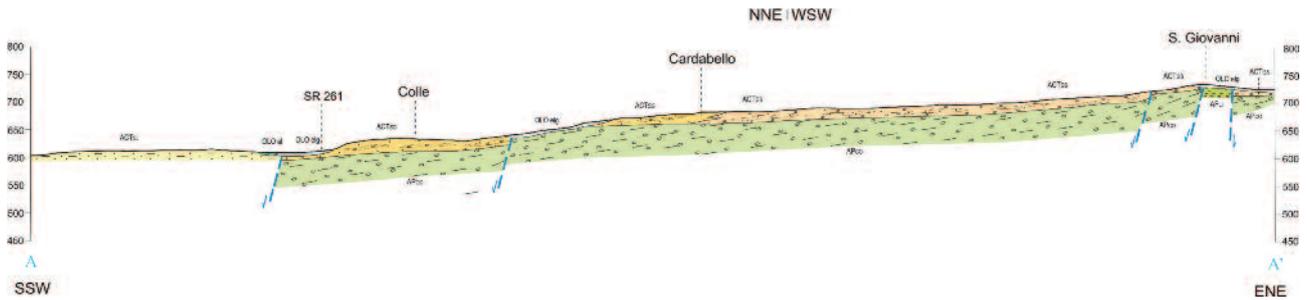
Una campagna di misure di *weak motion* e microtremori è stata condotta in situ sin dal 7 aprile 2009 (Fig. 5). Sono state acquisite misure in 5 postazioni di microtremori mediante un tromometro digitale (Micromed Tromino). Le misure di microtremori elaborate secondo la tecnica HVSR hanno evidenziato un notevole picco di risonanza (a circa 1 Hz) in tutte le misure, come evidenziato dalla figura 6. Gli accelerometri hanno registrato nei primi 3 giorni oltre 150 eventi sismici. L'ispezione visuale delle tracce rivela una evidente risonanza quasi monofrequenziale che allunga notevolmente la durata del moto del suolo (circa 75 s), come mostrato dalla figura 7, relativa all'evento del 2009/04/09 alle 00:52:59 con  $M_l = 5.1$ .

L'abitato di Onna è ubicato in corrispondenza della piana alluvionale del Fiume Aterno, in corrispondenza del nucleo abitativo i depositi sono essenzialmente rappresentati da depositi colluviali, ghiaie sabbiose e limi sabbiosi alluvionali, con grado di addensamento, cementazione e spessore estremamente variabili.

Il 7 Aprile 2009 sono state installate nell'area 5 stazioni equipaggiate di accelerometri Episensor e di acquisitori Reftek130. I dati estratti (eventi con magnitudo tra 3 e 5.3) sono stati utilizzati per calcolare i rapporti spettrali HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) e SSR (Spectral Standard Ratio) su terremoti (Fig. 8). I rapporti spettrali

Fig. 3  
Esempio di carta di livello 1. Area di San Demetrio ne' Vestini. (Gruppo di lavoro MS\_aq; rilievi ed elaborazioni cartografiche della Regione Emilia-Romagna).





sono stati calcolati selezionando una finestra di 10 secondi a partire dall'arrivo della fase S; data la vicinanza e l'entità dei terremoti registrati tale finestra comprende interamente la parte più energetica degli eventi. È stata eseguita la rotazione delle componenti orizzontali tra 0° e 175° con passo 5°, restituendo i rapporti spettrali medi per ogni direzione, in modo da indagare eventuali direzioni preferenziali di amplificazione. Nel grafico relativi ai rapporti spettrali sono presenti 36 curve (verdi) relative alle direzioni da 0° a 175° con passo 5°; in blu è evidenziata la curva di massima amplificazione, con la relativa deviazione standard. Sopra ai grafici è indicata la frequenza del picco HV e l'azimuth lungo il quale il picco ha la massima amplificazione. È molto evidente la frequenza di vibrazione fondamentale di 2.2 Hz con una discreta amplificazione. Non si sono registrati effetti di direzionalità. Su alcune sezioni litostratigrafiche rappresentative sono state condotte simulazioni numeriche (Sanò, 1996; Fig. 9).

### 3.2.4 Problemi aperti

I problemi aperti a cinque mesi dall'evento sono ancora molti, anche perché alcuni dati sono ancora in fase di raccolta o di elaborazione. In generale, ci sembra che due questioni siano più importanti di altre: gli effetti *near fault* e poter verificare quanto la vulnerabilità dell'edificato abbia influito sul danno. Al verificarsi di un evento sismico, le zone molto vicine alla sorgente sismogenetica possono essere



Fig. 4 Sezione litostratigrafica di Castelnuovo. La formazione indicata con L è costituita da limi argillosi e sabbie, i terreni del bedrock sono calcari (Gruppo di lavoro MS\_aq; rilievi ed elaborazioni cartografiche della Regione Emilia-Romagna).

Fig. 5 Veduta area di Castelnuovo. I triangoli rossi indicano i siti delle stazioni accelerometriche installate il 7 aprile, i pallini gialli indicano i siti di misura dei microtremori (Gruppo di lavoro MS\_aq; indagini dell'Univ. della Basilicata, INGV Milano, CNR IMAA, GFZ-Postdam).

I valori delle caratteristiche meccaniche dei terreni, stimate per le analisi, sono i seguenti:

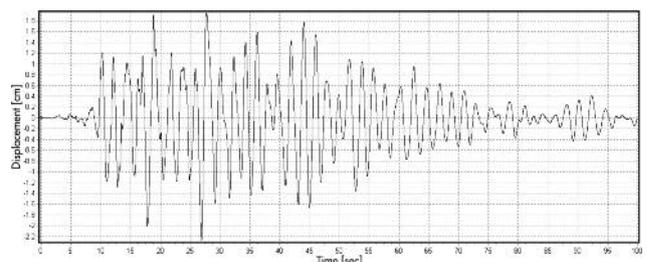
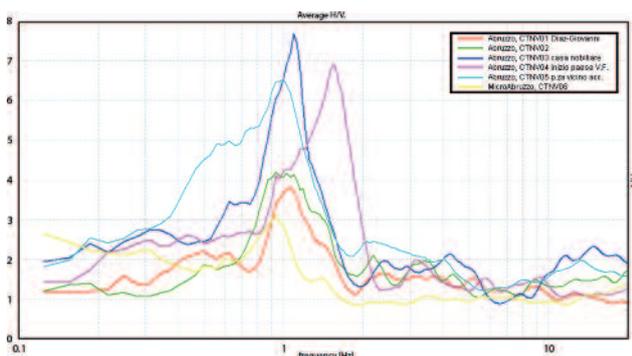
Calcari	$V_s = 1200 \text{ m/s}$
Brecce	$V_s = 1000 \text{ m/s}$
Limi	$V_s = 800 \text{ m/s}$
Ghiaie	$V_s = 400 \text{ m/s}$

Su questa sezione sono stati calcolati i valore di picco delle accelerazioni in superficie e i fattori di amplificazione (Fig. 10).

interessate da fenomeni legati alla direzionalità della propagazione della rottura e dello scorrimento sul piano di faglia (effetti *near fault*). Il moto del suolo dei siti vicini presenta caratteristiche peculiari. In particolare in direzione perpendicolare alla sorgente la storia della velocità presenterà un impulso, nelle prime fasi del segnale, in cui si concentra una gran quantità di energia (Sommerville, 1997; Chioccarelli e Iervolino, 2009). Per quanto riguarda la vulnerabilità, ad oggi (settem-

Fig. 6 Risultati della campagna di indagine dei microtremori (Gruppo di lavoro MS\_aq; indagini dell'Univ. della Basilicata, CNR IMAA).

Fig. 7 Time history relativa all'evento del 2009/04/09 alle 00:52:59 con  $M_l = 5.1$  (Gruppo di lavoro MS\_aq; indagini dell'Univ. della Basilicata, INGV Milano, CNR IMAA, GFZ-Postdam).



bre 2009), è stata analizzata con il dettaglio necessario solo nell'abitato di Onna e di San Gregorio; per queste due località non sono state

ancora effettuate elaborazioni per comprendere quanto sia il suo contributo per la valutazione del danno rispetto al contributo della pericolosità.

Fig. 8  
Rapporti H/V con registrazioni weak motion nell'area di Onna (Gruppo di lavoro MS\_aq; indagini di INGV Milano).

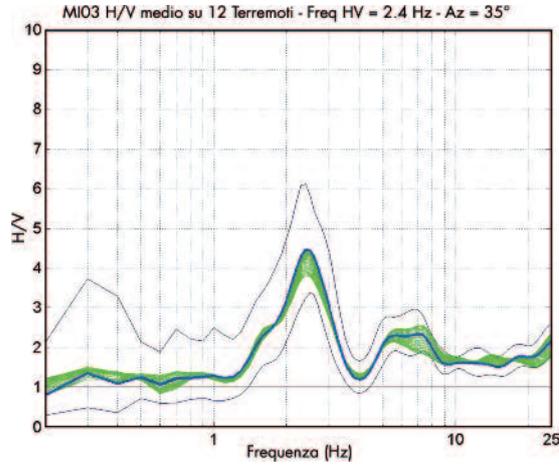


Fig. 9  
Sezione litostratigrafica tra Monticchio e San Gregorio.

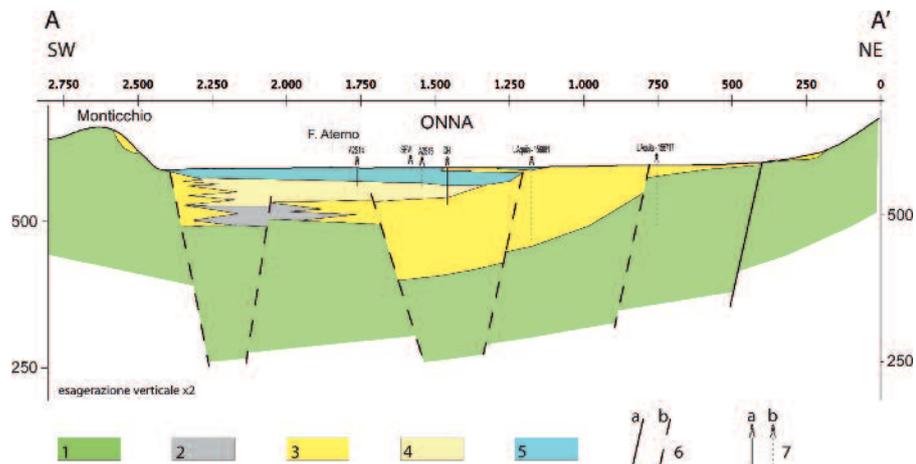
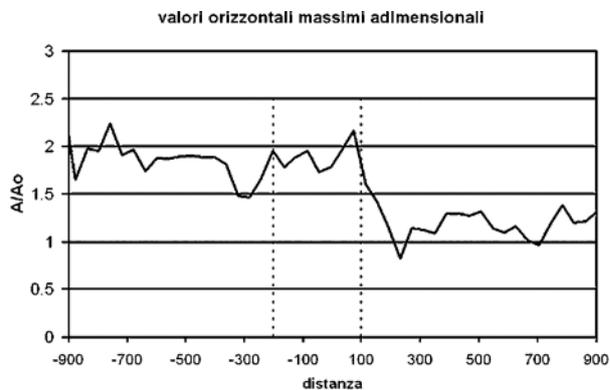


Fig.10  
Fattori di amplificazione derivanti dalle simulazioni numeriche 2D della sezione della figura 9 (Gruppo di lavoro MS\_aq; indagini geologiche di CNR IGAG, simulazioni numeriche del Dipartimento della Protezione Civile). Si noti la differenza di risposta ad Onna (area tra le linee tratteggiate) e nell'area tra Onna e l'estremità orientale del profilo (area industriale di Bozzano) che giustifica la differenza di danno nelle due aree. Questo effetto è dovuto in gran parte alla forma delle discontinuità in profondità tra strato e strato.



**Bibliografia**

Sommerville (1997) - Engineering characteristic of near fault ground motion. SMIP97 Seminar proceedings.  
Chioccarelli, Iervolino (2009) - Direttività e azione sismica: discussione per l'evento de L'Aquila. Convegno Anidis 2009.

Gruppo di lavoro MS (2008) - Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica; 3 vol. e 1 DVD.  
Sanò (1996) - BESOIL. Un programma per il calcolo della propagazione delle onde sismiche. Servizio Sismico Nazionale, Rapporto Tecnico SSN/RT/96/9.