

Il terremoto del 6 aprile 2009 e gli studi di Microzonazione Sismica per la ricostruzione dell'area aquilana

*Sergio Castenetto**

1. Il terremoto del 6 aprile 2009

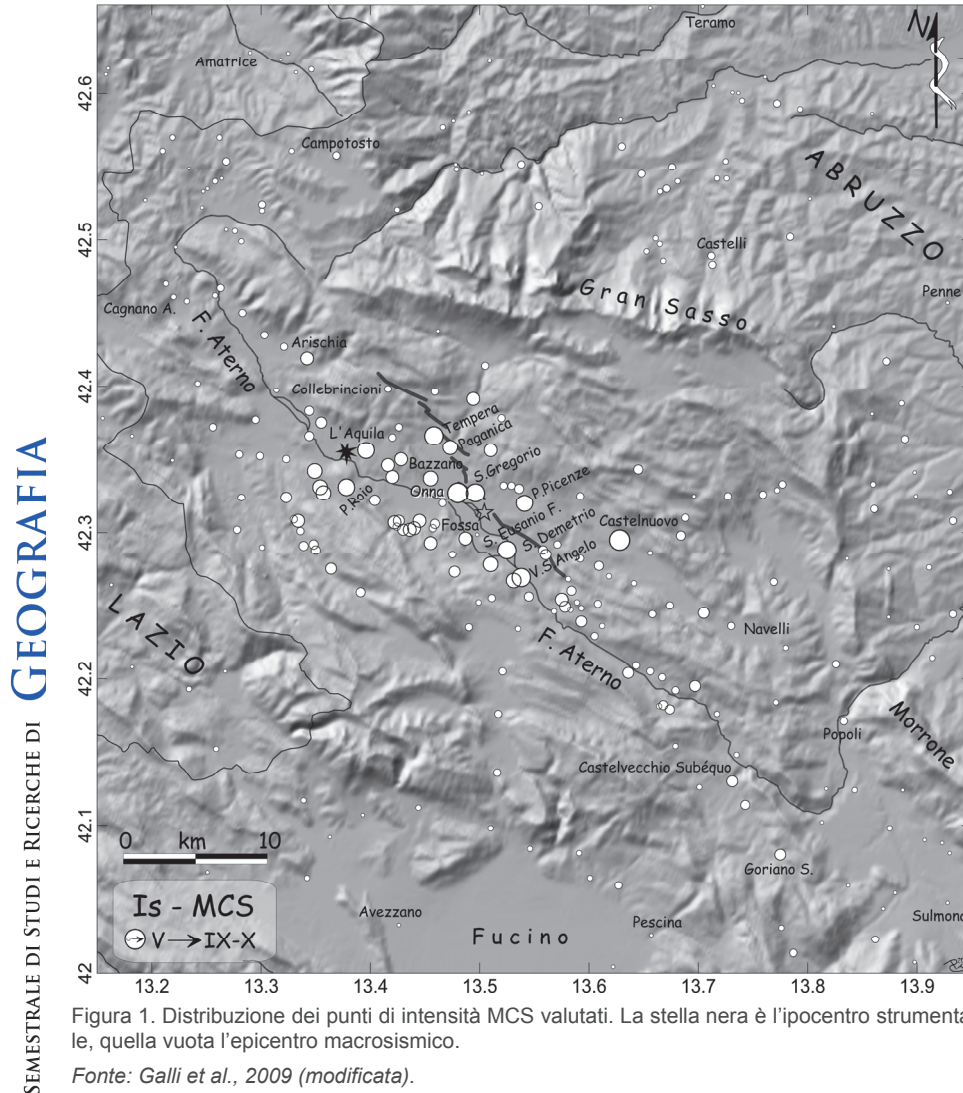
Il 6 Aprile 2009 alle ore 03:32 il territorio aquilano è colpito da una scossa di terremoto di magnitudo locale M_l 5,8 (magnitudo momento M_w 6,3) e intensità macrosismica all'epicentro (I_0) pari al IX-X grado MCS (scala Mercalli Cancani Sieberg). L'Aquila, posta nell'area epicentrale, subisce danni gravissimi: circa un quarto del patrimonio abitativo risulta inagibile (Fig. 1).

Si contano circa 1.500 feriti e 300 vittime, concentrate soprattutto nel capoluogo e nella frazione di Onna, 8 km a sudest della città. È la prima volta, dopo la catastrofe sismica calabro messinese del 1908, che una città viene così duramente colpita da un evento sismico, che provoca, oltre ai danni ai fabbricati ed al patrimonio storico monumentale, un fortissimo impatto sociale, economico e culturale, come di recente si ricorda solo in occasione del terremoto dell'Irpinia e Basilicata del 23 novembre 1980.

Il terremoto era stato preceduto da una lunga sequenza sismica ($M_l < 4,0$) iniziata nella seconda metà di dicembre 2008 nella zona a sudovest di L'Aquila (bacino di Roio) e culminata con un evento di $M_l = 4,1$ il 30 Marzo 2009. Due scosse avvenute a cavallo della mezzanotte del 5 Aprile 2009 (M_l 3,9 e M_l 3,5), fortemente avvertite dalla popolazione aquilana, avevano indotto molte persone a passare la notte nelle automobili o a spostarsi in luoghi ritenuti più sicuri. La violenta scossa delle ore 03:32 ha così causato meno vittime di quante la gravità dei crolli ne avrebbe potute provocare. Inoltre, il numero di abitanti coinvolti in crolli sarebbe stato più alto se il terremoto fosse avvenuto di giorno, vista la quantità e l'importanza di alcuni edifici pubblici fortemente danneggiati o crollati (ad esempio la prefettura di L'Aquila e diverse scuole in tutta la provincia).

La sequenza sismica è proseguita con moltissime repliche, due delle quali hanno superato nuovamente magnitudo 5, il 7 aprile (M_l 5,3) e il 9 aprile (M_l 5,1), interessando un'area che si estende per oltre 30 km in direzione nordovest-sudest, parallelamente all'asse della catena appenninica, lungo la valle del fiume Aterno.

* Roma, Ufficio Rischio sismico e vulcanico, Servizio Gestione tecnica post-evento, Dipartimento della Protezione Civile.



La replica più forte, registrata alle 19:47 del 7 aprile, ha interessato il settore più meridionale dell'area aquilana, in prossimità dei centri abitati di San Martino d'Ocre, Fossa, San Felice d'Ocre. L'evento del 9 aprile, di M_l 5,1, è stato localizzato invece a nord de L'Aquila, verso il lago di Campotosto.

Nell'arco di un mese dalla scossa principale del 6 aprile, la rete sismometrica nazionale, gestita dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), ha registrato e localizzato circa 5.000 terremoti; di questi circa 150 di magnitudo superiore a 3,0; le altre sono state scosse strumentali non avvertite dalla popolazione.

La notevole diffusione e gravità del danno, in particolare lungo la media valle del fiume Aterno, è stata certamente determinata dalla magnitudo del terremoto e dalla presenza in alcuni casi di condizioni geologiche che hanno

amplificato il moto del terreno; ma è stata favorita soprattutto dalle caratteristiche del patrimonio edilizio, estremamente vulnerabile, costituito da edifici di pessima qualità sia per i materiali utilizzati che per l'assenza di interventi di recupero o ristrutturazione soprattutto nei centri storici, in maggioranza abbandonati.

2. Sismicità dell'area

La scossa sismica del 6 aprile 2009 ha interessato un'area già colpita in passato da forti terremoti, di cui si ha traccia a partire dal XIV secolo, con una frequenza di comparsa relativamente elevata e una intensità macrosismica massima osservata pari al X grado della scala MCS (Fig. 2).

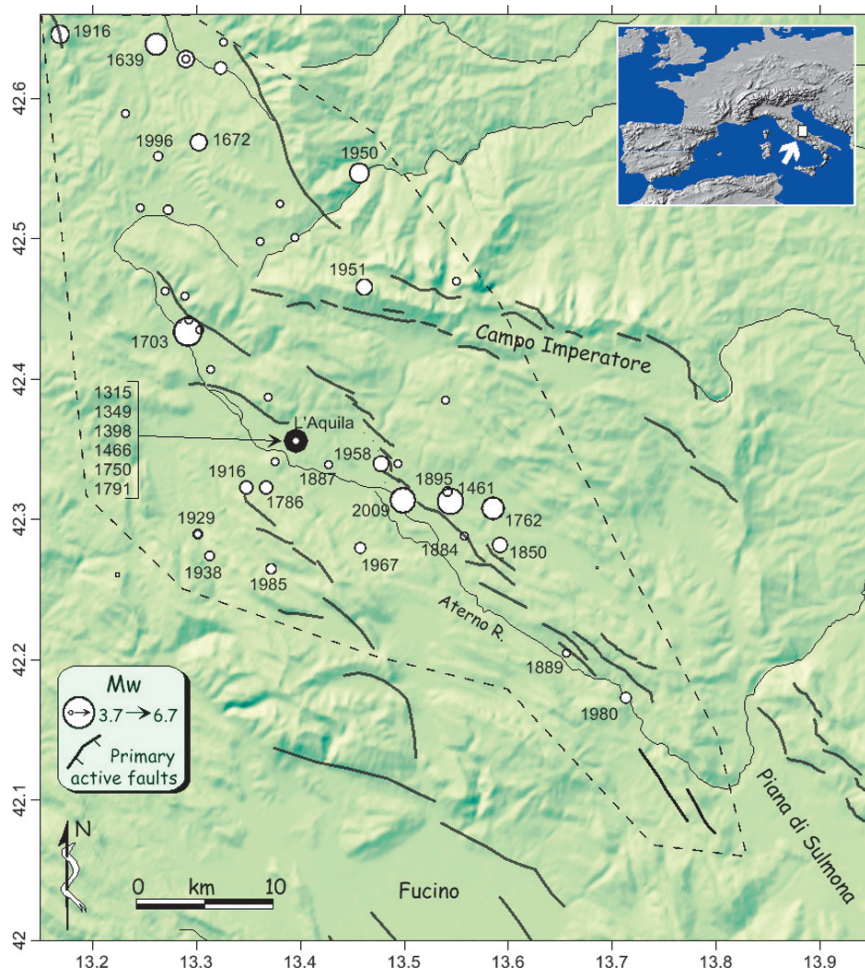


Figura 2. Distribuzione degli epicentri dei terremoti storici lungo la valle del fiume Aterno (area a tratteggio). Le linee nere sono le faglie attive della regione.

Fonte: Galli et al., 2010.

Il settore di Appennino centrale in cui ricade l'Abruzzo è caratterizzato dalla presenza di tre importanti aree sismogenetiche, rappresentate dall'Aquilano (media ed alta valle del fiume Aterno), dalle zone del Fucino e della Maiella, in ognuna delle quali ha avuto origine un terremoto di elevata energia:

- l'area dell'Aquilano è caratterizzata dalla presenza del grande terremoto del 2 febbraio 1703 ($I_0=X$ grado MCS e $M_w=6,7$), dei forti terremoti del 26 novembre 1461 ($M_w 6,4$) e del 6 ottobre 1762 ($M_w 6,0$) e dai terremoti di magnitudo più modesta del 22 aprile 1916 ($M_w 5,2$) e 24 giugno 1958 ($M_w 5,2$);
- l'area del Fucino è caratterizzata dalla presenza del grande terremoto del 13 gennaio 1915 ($I_0=X$ MCS e $M_w=7,0$) e di pochi altri eventi di magnitudo più modesta;
- l'area della Maiella è caratterizzata dalla presenza del grande terremoto del 3 novembre 1706 ($I_0=X-XI$ MCS e $M_w=6,8$) e del forte terremoto del 26 settembre 1933 ($I_0=IX$ MCS e $M_w=5,8$).

Nell'area che comprende la zona colpita dalla sequenza sismica aquilana, la scossa del 6 aprile può essere essenzialmente paragonata, in termini di energia rilasciata, ai terremoti del 1461, 1762, 1916 e 1958, che hanno provocato danni a L'Aquila e dintorni. L'evento del 1461, in particolare, si distingue per la somiglianza con quello attuale, con un gravissimo quadro di danni a L'Aquila e in alcune località minori dell'area posta a sud-est, lungo la valle del fiume Aterno, e caratterizzato da una lunga serie di repliche alcune delle quali molto forti. Le fonti attestano la distruzione quasi totale di Onna, Poggio Picenze, Castelnuovo e Sant'Eusanio Forconese, che anche in occasione del terremoto attuale sono risultate tra le località più gravemente danneggiate.

Al fine di fornire elementi di supporto a simili letture, nella Tab. I sono elencati e descritti alcuni dei più forti terremoti del passato con epicentro nel territorio regionale, estratti dal Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI, 2004).

3. *L'edilizia*

La fragilità del patrimonio edilizio ha giocato un ruolo fondamentale nella gravità dei danni osservati nell'area aquilana, dove sono presenti tipologie e qualità edilizie molto diverse.

All'interno dei centri storici di quasi tutte le località e nel capoluogo, sono molto diffusi nuclei di edilizia storica in pietra, solitamente non squadrata, di dimensioni e forma irregolare e murature a sacco, costituite da due paramenti (uno interno ed uno esterno) riempiti con ciottoli, pietre e malta povera. Spesso tali edifici risultavano in completo stato di abbandono da decenni ed in precarie condizioni di stabilità già prima del terremoto (Fig. 3). Negli stessi centri abitati è presente un'edilizia più recente in muratura di mattoni o edifici vecchi in condizioni di manutenzione accettabili, che hanno generalmente ben sopportato le azioni sismiche subendo in alcuni casi danni lievi o trascurabili, come pure gli edifici moderni con struttura in cemento

armato. Danni gravi e crolli parziali si sono osservati anche in edifici sui quali erano stati eseguiti interventi recenti di recupero, a causa della sovrapposizione di cordoli e pesanti coperture in cemento armato su mura portanti che non erano state rinforzate in modo adeguato.

Tabella I. Alcuni dei più forti terremoti del passato con epicentro nel territorio regionale abruzzese.

DATA	AREA EPI-CENTRALE	I MCS MAGNITUDO	DESCRIZIONE
9 settembre 1349	Aquilano	IX-X Mw=6,5	Fu uno dei più importanti eventi sismici verificatisi nell'Appennino centro-meridionale, i cui effetti furono probabilmente dovuti a scosse provenienti da aree epicentrali distinte
26 novembre 1461	Aquilano	X Mw=6,5	Si registrarono effetti distruttivi nella città de L'Aquila. Danni importanti si ebbero in tutto il territorio circostante. 100 le vittime
2 febbraio 1703	Aquilano	X Mw=6,7	Questo periodo sismico, che interessò tutta l'Italia centrale, è uno dei più gravi della storia sismica italiana. Una prima scossa, il 14 gennaio, colpì l'Umbria meridionale (Norcia e Cascia), le provincie di Rieti e l'Aquila. Una nuova forte scossa il 2 febbraio provocò i danni maggiori a L'Aquila e dintorni. 150 furono i paesi danneggiati e 10.000 le vittime
3 novembre 1706	Maiella	IX-X Mw=6,6	La scossa colpì la zona della Maiella, tra l'Abruzzo meridionale e il Molise. Danneggiati Sulmona e altri centri posti lungo i versanti della Maiella. 2400 le vittime
6 ottobre 1762	Aquilano	IX Mw=5,9	Furono colpiti violentemente Castelnuovo e Poggio Picenze nei pressi de L'Aquila
24 febbraio 1904	Marsica	VIII-IX Mw=5,7	Vennero colpiti principalmente alcuni paesi di montagna, sparsi su una superficie di circa 140 kmq. I centri più danneggiati furono: Rosciolo dei Marsi, Magliano de' Marsi, Scurcola Marsicana, Cappelle, Sorbo, Poggio Filippo, San Donato, Gallo e Scanzano
13 gennaio 1915	Avezzano	XI Mw=7,0	La scossa interessò gran parte dell'Italia centrale distruggendo completamente la città di Avezzano, provocando danni gravissimi a tutti i paesi dell'area fucense e circa 30.000 vittime. Gravi danni anche lungo la Valle Roveto e la media Valle del Liri
26 settembre 1933	Maiella	VIII-IX Mw=5,7	Furono colpiti i paesi posti alle falde del massiccio della Maiella, nell'Abruzzo meridionale. Danni a Lama dei Peligni, Taranta Peligna, Fara San Martino e Civitella Messer Raimondo situati nell'alta valle del fiume Aventino, nel versante sud della Maiella, in provincia di Chieti. Danni nel versante nord del massiccio montuoso, a Salle e in alcune frazioni di Caramanico Terme, in provincia di Pescara. 12 le vittime
7 maggio 1984	Appennino Abruzzese	VIII Mw=5,9	Venne interessata la zona dell'Alto Sangro fra cui Palena. Tutta la regione montuosa della Maiella risentì del sisma in particolare le zone da Alfedena fino alla costa adriatica

In alcuni casi, anche costruzioni con struttura in cemento armato hanno subito danni gravi fino al collasso, evidenziando un comportamento inatteso rispetto alle azioni sismiche che avrebbero dovuto sopportare. Su questi casi è stata avviata dall'autorità giudiziaria una procedura di accertamento delle eventuali responsabilità.

In generale, quindi, nella distribuzione e nel grado di danneggiamento delle costruzioni si evidenzia una forte componente di vulnerabilità sismica, associata talvolta ad effetti molto evidenti di amplificazione locale dello scuotimento, come nel caso di alcuni centri ubicati nella media valle dell'Aterno, sulle alluvioni soffici (Onna) o su alture costituite dai limi bianchi medio-pleistocenici (Castelnuovo).



Figura 3. Un esempio di edificio gravemente danneggiato dal terremoto nella frazione di Onna (AQ).

Foto: S. Castenetto (aprile 2009).

4. *Gli effetti locali*

In una situazione ideale, gli effetti di un terremoto dovrebbero attenuarsi con la distanza secondo una legge lineare: maggiore la distanza dall'epicentro, minore lo scuotimento. Dopo un terremoto, in realtà, l'osservazione dei danni provocati alle costruzioni e alle infrastrutture spesso evidenzia differenze sostanziali in centri abitati anche a piccola distanza tra loro. In alcuni casi si osservano crolli e danni notevoli in località che si trovano a grandi distanze dall'epicentro.

Gli effetti che provoca un'onda sismica sulle costruzioni sono infatti influenzati oltre che, naturalmente, dalla qualità delle costruzioni stesse, dalle

caratteristiche geologiche e morfologiche locali: lo spessore dei terreni superficiali, la successione dei terreni presenti sotto la copertura superficiale, la presenza di aree in dissesto, zone di cresta morfologica, fondovalle, versanti ripidi, ecc. L'insieme di tali caratteristiche, e di altre che si potrebbero aggiungere, costituisce il quadro delle «condizioni locali al sito», determinanti per il tipo e per l'entità degli effetti provocati da un terremoto (risposta sismica) (Fig. 4). In generale si osserva uno scuotimento maggiore (amplificazione) nelle aree caratterizzate da una copertura di terreni soffici – terreni recenti, come le alluvioni fluviali o i depositi lacustri – piuttosto che su roccia compatta. Inoltre, poiché le onde sismiche sono onde elastiche che provocano l'oscillazione delle particelle di terreno con frequenze (numero di oscillazioni nell'unità di tempo) variabili, le onde sismiche possono anche essere modificate nel loro contenuto in frequenze non solo dalle caratteristiche geologiche dei terreni, ma anche dalla morfologia della superficie che incontrano, un po' come accade per le onde sonore che subiscono, in certe condizioni, fenomeni di eco. Se il numero di oscillazioni del terreno nell'unità di tempo coincide con quello che si definisce «periodo proprio» di un edificio, cioè la frequenza alla quale la struttura comincia ad oscillare violentemente, l'edificio può entrare in «risonanza» e subire danni molto gravi o crollare. Questo è il motivo per cui si osservano spesso danni maggiori sugli edifici posti in cima a rilievi, lungo orli di scarpata, ma anche in quelle aree dove sono a contatto terreni con diverse caratteristiche di risposta sismica (terreni rigidi a contatto con terreni soffici).

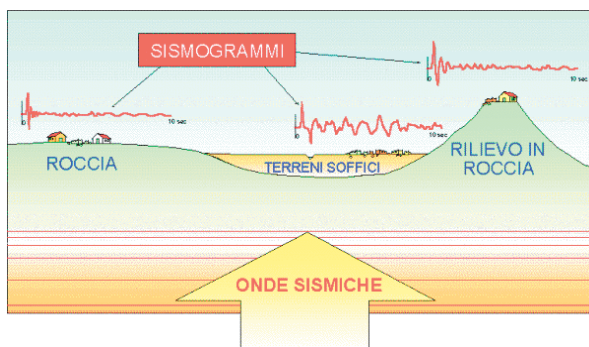


Figura 4. La risposta sismica locale, ossia l'intensità locale dello scuotimento, è influenzata dalle condizioni litologiche e morfologiche del sito.

Gli effetti locali si distinguono in:

- «effetti di sito», dovuti all'amplificazione dello scuotimento a causa delle caratteristiche meccaniche dei terreni e/o della morfologia del rilievo;
- «effetti di instabilità», innescati dal passaggio delle onde sismiche, rappresentati da rotture di faglia, movimenti franosi, liquefazioni, cedimenti. Gli effetti di instabilità sono in genere una conseguenza degli effetti di sito e si verificano quando le azioni sismiche superano la resistenza al taglio di terreni.

In occasione del terremoto aquilano del 6 aprile 2009, situazioni di questo tipo sono state riscontrate sia all'interno del territorio comunale de L'Aquila che in alcuni comuni lontani, come a San Pio delle Camere, nella frazione di Castelnuovo (circa 30 km a SE dall'epicentro).

Tutto ciò è oggetto degli studi di Microzonazione Sismica (MS), attraverso i quali è possibile:

- identificare e perimetrare le aree a differente pericolosità sismica locale (microzone, solitamente grandi alcuni ettari o alcuni isolati);
- stimare le risposte dei terreni delle diverse microzone, in modo da stabilire gerarchie di pericolosità e fornire elementi conoscitivi per una pianificazione del territorio e per una progettazione delle opere, adeguate alla pericolosità sismica del sito.

5. *Lo sviluppo degli studi di Microzonazione Sismica*

Le problematiche trattate dagli studi di Microzonazione Sismica hanno avuto un forte sviluppo a livello scientifico negli ultimi 40 anni, anche se l'importanza delle caratteristiche di resistenza e stabilità dei suoli in prospettiva sismica era emersa già in epoca passata. A partire dal XVIII secolo, con l'affermarsi della visione illuminista dei fenomeni naturali, era apparso chiaro a molti studiosi che le condizioni locali dei terreni di fondazione condizionavano in modo importante gli effetti del terremoto. Un secolo fa, le prime norme tecniche nazionali, approvate con regio decreto n. 193 del 18 aprile 1909, a seguito del disastroso terremoto di Messina e Reggio Calabria del 1908, stabilivano 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 ambito internazionale, uno studio del 1969 condotto da alcuni ricercatori americani sul terremoto di San Francisco del 1957 (Idriss, Bolton Seed, 1968), evidenziò come nell'ambito della stessa città, a poche centinaia di metri di distanza, lo stesso terremoto avesse provocato scuotimenti decisamente differenti in relazione agli spessori e alle caratteristiche geomeccaniche dei terreni presenti negli strati più superficiali. Da allora sono stati eseguiti molti studi su forti terremoti (es. Friuli, 1976; Irpinia, 1980; Città del Messico, 1985; Kobe, Giappone 1992; Izmit, Turchia 1999; San Giuliano di Puglia, 2002), raccolti dati e informazioni che hanno dimostrato come le caratteristiche locali del territorio possano modificare in maniera evidente l'azione sismica.

6. *Gli obiettivi e i contenuti degli studi di Microzonazione Sismica*

Gli studi di Microzonazione Sismica hanno l'obiettivo di razionalizzare la conoscenza sulle modifiche che lo scuotimento sismico può subire in superficie, fornendo informazioni utili per il governo del territorio, per la progettazione, per la pianificazione d'emergenza e per la ricostruzione post sisma.

Nella «pianificazione territoriale», gli studi di Microzonazione Sismica

sono di fondamentale importanza per:

- orientare la scelta delle aree da destinare a nuovi insediamenti;
- definire gli interventi edificatori ammissibili in una data area;
- programmare le indagini e i livelli di approfondimento degli studi sulla risposta sismica locale;
- stabilire orientamenti e modalità di intervento per la riduzione del rischio nelle aree urbanizzate;
- definire priorità di intervento.

Nella «pianificazione d'emergenza», sia di livello comunale che provinciale, la conoscenza dei possibili effetti locali indotti da un evento sismico su un territorio contribuisce a:

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

Nella fase di «ricostruzione» la Microzonazione Sismica:

- contribuisce alla scelta delle aree per gli insediamenti provvisori;
- fornisce elementi ai tecnici e agli amministratori, sull'opportunità di ricostruire gli edifici non agibili;
- contribuisce alla scelta delle nuove aree edificabili.

Nella «progettazione di nuove opere» o di interventi su opere esistenti, gli studi di Microzonazione Sismica evidenziano la possibile presenza di fenomeni di amplificazione dello scuotimento, legati alle caratteristiche litostigrafiche e morfologiche dell'area, e di fenomeni di instabilità e deformazione permanente attivati dal sisma. Gli studi di Microzonazione Sismica, quindi, possono offrire elementi conoscitivi utili per la progettazione, con differente incisività in funzione del livello di approfondimento e delle caratteristiche delle opere stesse, indirizzando alla scelta delle indagini di dettaglio finalizzate alla valutazione della risposta sismica locale, come previsto dalle vigenti Norme tecniche per le costruzioni (NTC08).

7. I livelli di approfondimento

I contenuti e la complessità di una indagine di Microzonazione Sismica dipendono dai livelli di approfondimento che si vogliono raggiungere, a cui naturalmente corrispondono risorse diverse, economiche e professionali, da mettere in campo. Da non sottovalutare è anche il contesto in cui si opera: in prevenzione o in emergenza, che si riflette sui tempi di realizzazione e sulla scelta delle metodologie. I livelli di possibile approfondimento sono tre. Al momento di decidere l'esecuzione dello studio, per stabilire il livello di approfondimento occorre tener presente l'utilità che dallo studio può derivare,

in modo da compararla con i costi da affrontare. Il miglioramento della conoscenza prodotto dagli studi di Microzonazione Sismica può contribuire concretamente, insieme a studi di vulnerabilità ed esposizione, all'ottimizzazione delle risorse rese disponibili per interventi mirati alla mitigazione del rischio sismico.

Le modalità tecniche di esecuzione e di applicazione della Microzonazione Sismica sul territorio italiano sono definite dagli «Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica», approvati nel 2008 dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province autonome (Gruppo di lavoro MS, 2008).

In termini generali, per approfondimenti successivi, gli studi di microzonazione comprendono le seguenti attività:

- reperimento e archiviazione dei dati geologici, geofisici, geotecnici pregressi;
- esecuzione di indagini geologiche (rilevamento, sondaggi, prove in situ);
- esecuzione di indagini geofisiche (geoelettrica, sismica, gravimetrica);
- analisi strumentali (dati sismometrici/accelerometrici);
- analisi di laboratorio (prove geotecniche);
- simulazioni numeriche del moto sismico.

7.1. Livello 1

Il livello 1 di MS è propedeutico ai veri e propri studi di microzonazione e obbligatorio per affrontare i successivi livelli di approfondimento.

Il quadro conoscitivo necessario per realizzare tale livello si basa sulla raccolta dei dati pregressi: rilievi geologici, geomorfologici e geologico-tecnici, sondaggi, indagini geofisiche. La sintesi dei dati e delle cartografie disponibili consente di realizzare i seguenti prodotti:

- carta delle indagini, nella quale sono ubicate e distinte per tipologia tutte le indagini puntuali e lineari disponibili (Fig. 5);
- carta geolitologica e sezioni geolitologiche, nella quale sono descritte le diverse unità litologiche riconosciute e definiti i rapporti stratigrafici. La carta riporta i limiti delle unità litologiche riconosciute nell'area di studio, distinte sulla base delle caratteristiche fisiche delle rocce e non della loro età o associazione di fossili. La carta riporta anche gli elementi tettonici non attivi (faglie, pieghe, sovrascorrimenti) e geomorfologici. Le sezioni ricostruiscono la successione in profondità e la geometria (spessori, giacitura) delle unità litologiche riconosciute nell'area di studio, compreso l'andamento in profondità delle strutture tettoniche non attive;
- carta delle Microzone omogenee in prospettiva sismica (Mops), scala 1:5.000 – 1:10.000, che individua le zone dove, sulla base delle osservazioni geologiche e geomorfologiche e della valutazione dei dati litostratigrafici (dati pregressi già disponibili per l'area e nuovi dati acquisiti), è prevedibile l'occorrenza di diversi tipi di effetti prodotti dall'azione sismica (Fig. 6).

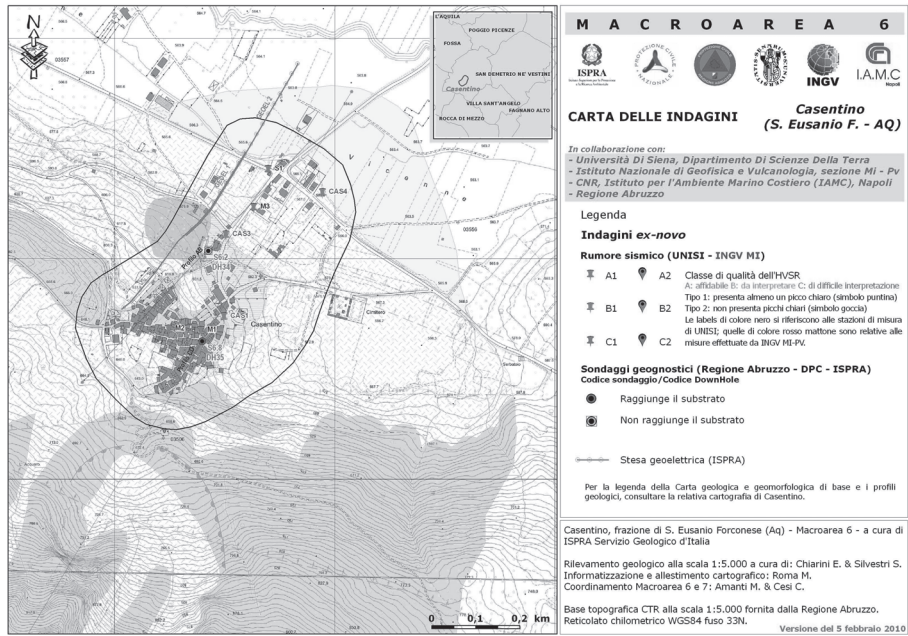


Figura 5. Esempio di carta delle indagini realizzata per la Microzonazione Sismica della frazione Casentino, nel comune di Sant'Eusanio Forconese (AQ).

Fonte: AA. Vv., 2010.

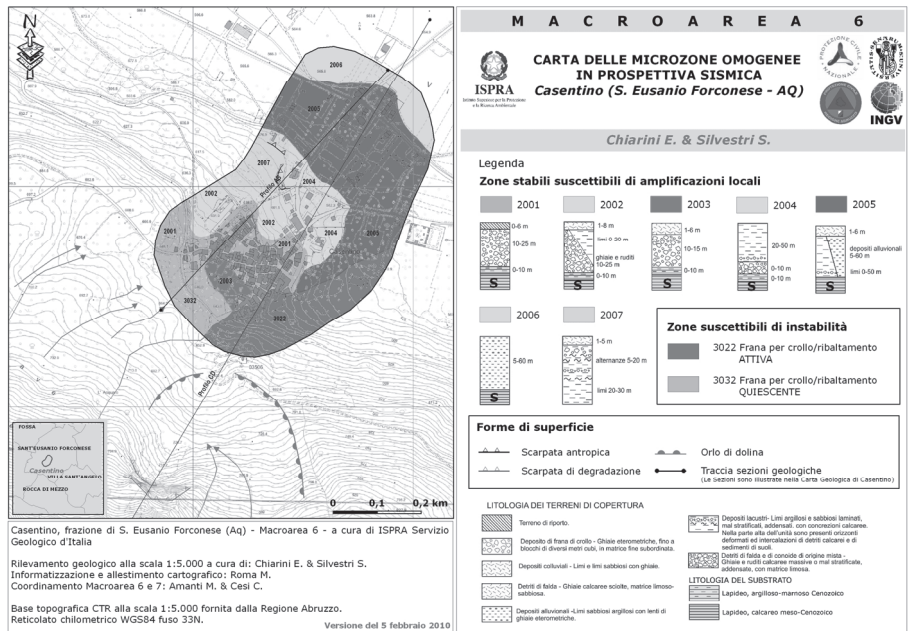


Figura 6. Esempio di carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MS livello 1) realizzata per la frazione Casentino, nel comune di Sant'Eusanio Forconese (AQ).

Fonte: AA. Vv., 2010.

In particolare le zone sono classificate in tre categorie:

- zone stabili, nelle quali non si ipotizzano effetti locali di rilievo di alcuna natura (substrato geologico in affioramento con morfologia pianeggiante o poco inclinata, pendii con inclinazione inferiore a circa 15°);
- zone stabili suscettibili di amplificazioni locali, nelle quali sono attese amplificazioni del moto sismico, come effetto dell'assetto litostratigrafico e morfologico locale;
- zone suscettibili di instabilità, nelle quali gli effetti sismici attesi e predominanti sono riconducibili a deformazioni permanenti del territorio (non sono necessariamente esclusi per queste zone anche fenomeni di amplificazione del moto): instabilità di versante, liquefazioni, faglie attive e capaci, cedimenti differenziali.

I limiti di una MS di livello 1 sono rappresentati: dalla possibile presenza di litologie delle quali non è noto lo spessore, dagli elementi tettonici (es. faglie, pieghe) da ricostruire nel loro assetto e nella loro geometria (direzione, immersione, pendenza, profondità); dalla presenza di aree instabili la cui geometria e dinamica risultano incerte. Pertanto, tale livello consente solo di definire qualitativamente le zone omogenee per finalità di pianificazione territoriale e risulta utile ad orientare le indagini di approfondimento previste dai livelli di MS successivi. In sostanza, nelle zone instabili dovrà essere stabilita l'inedificabilità, mentre nelle zone suscettibili di amplificazione i regolamenti edilizi dovranno prevedere, per la progettazione delle opere, specifiche analisi per la definizione dei fattori di amplificazione.

7.2. Livello 2

Per risolvere le incertezze del livello 1, gli «Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica» prevedono un livello 2 di approfondimento che, attraverso l'esecuzione di indagini economiche e poco invasive, consente di meglio definire il modello geologico del sottosuolo e di fornire per ciascuna microzona identificata una quantificazione numerica degli effetti, ottenuta con metodi semplificati.

Le indagini sono fondamentalmente di tipo geofisico, quali la sismica a rifrazione, le analisi strumentali con tecniche attive e passive per la stima delle V_s (velocità di propagazione delle onde trasversali S), misurando microtre-mori ed eventi sismici. Quando possibile, in funzione delle risorse a disposizione, possono essere eseguite prove geofisiche in foro (Down Hole, Cross Hole), finalizzate alla definizione di un profilo delle velocità V_s in profondità.

Il valore della V_s è indispensabile per attribuire i terreni di copertura ad una delle categorie di suolo previste dalle NTC08 e quindi per ottenere gli spettri di risposta elastici, ossia le ampiezze dello scuotimento per i diversi periodi di vibrazione del terreno, e i parametri necessari alla progettazione. La V_s è poi importante, come vedremo, per la definizione del fattore di amplificazione attraverso l'uso di appositi abachi. La V_s è maggiore nei terreni rigidi, minore nei terreni soffici e tende ad aumentare con la profondità.

Attraverso correlazioni e confronti con i risultati del livello 1, si giunge ad una revisione del modello geologico, e alla realizzazione di una carta di MS nella quale le zone a comportamento omogeneo sono caratterizzate non solo qualitativamente ma anche da un parametro numerico descrittivo degli effetti attesi (fattore di amplificazione), ottenuto con metodi semplificati. Sulle carte di MS di livello 2 si distinguono dunque:

- zone stabili;
- zone stabili suscettibili di amplificazioni locali, caratterizzate da fattori di amplificazione relativi a due periodi dello scuotimento (FA e FV);
- zone di deformazione permanente, caratterizzate da parametri quantitativi (spostamenti e aree accumulo per frana, calcolo dell'indice del potenziale di liquefazione).

I parametri FA e FV rappresentano il rapporto tra gli spettri di risposta elastica di input (moto sismico alla base della copertura) e di output (moto sismico in superficie), rispettivamente in accelerazione e in pseudo velocità, calcolati in un intervallo intorno ai periodi di vibrazione del terreno TA e TV dove l'ampiezza è massima. L'intervallo di periodi considerato per FA varia tra 0,1 e 0,3 s (alte frequenze), mentre per gli FV l'intervallo varia tra 0,6 e 1,4 s (basse frequenze).

Gli abachi, tabelle che consentono di definire il parametro di amplificazione del moto sismico da attribuire a ciascuna Mops, sono costruiti per un modello ideale di sottosuolo, costituito da terreni omogenei a strati orizzontali, piani e paralleli, di estensione infinita e Vs costante, su un *bedrock* sismico ($V_s=800$ m/s).

Le tabelle degli abachi contenute negli ICMS, costruite adottando delle semplificazioni che le rendano applicabili all'intero territorio nazionale, sono ordinate per:

- litotipo (ghiaia, sabbia, argilla);
- tipo di profilo di Vs (costante, gradiente massimo, gradiente intermedio), ossia andamento della velocità delle onde trasversali in profondità.

Per trovare il valore di FA o FV utilizzando gli abachi bisogna conoscere:

- ag, accelerazione dell'evento di riferimento. Gli abachi considerano tre livelli di pericolosità, basso, medio ed elevato (0,06-0,18-0,26 g), da definire sulla base della classificazione sismica del territorio;
- litotipo prevalente della copertura;
- spessore stimato della copertura;
- Vs media della copertura.

In assenza di dati di Vs sperimentali, la Vs può essere determinata a partire dalle frequenze proprie di vibrazione del terreno $F_0=1/T_0$ ottenute con analisi strumentali (microtremori o rumore ambientale), sulla base della relazione $T_0=4H/V_s$.

Le vibrazioni ambientali (o rumore sismico ambientale o microtremori) sono movimenti del terreno caratterizzati da ampiezze non percepibili dal-

l'uomo ($10^{-4} - 10^{-2}$ mm), osservabili in ogni parte della superficie della Terra. Queste vibrazioni sono l'effetto di una molteplicità di sorgenti agenti a diverse frequenze: onde marine e perturbazioni atmosferiche, ad esempio, contribuiscono al campo d'onda prevalentemente a frequenze inferiori a 0,5 Hz; vento, traffico veicolare e attività industriali contribuiscono prevalentemente a frequenze superiori a 0,5 Hz.

Il valore di amplificazione che si ottiene con gli abachi non è affidabile nel caso di:

- amplificazioni topografiche;
- forme sepolte (amplificazioni 2D);
- inversioni di velocità (terreno rigido, V_s maggiore, su terreno soffice, V_s minore);
- presenza di instabilità.

Affinché tale strumento risulti più efficace e aderente ai diversi contesti fisici del territorio, è utile che gli abachi per il livello 2 di MS siano predisposti dalle regioni a partire da:

- input sismici (ag) definiti attraverso studi regionali di pericolosità di base;
- modelli litologici coerenti con l'assetto geologico regionale;
- curve di decadimento della rigidità (G) e di incremento dello smorzamento (D) con la deformazione, per ciascun litotipo, definite da analisi di laboratorio su campioni dei terreni di copertura;
- profili di V_s misurati attraverso indagini mirate.

In alternativa e in attesa della loro definizione possono essere utilizzati gli abachi di ICMS validi, come già detto, per l'intero territorio nazionale.

7.3. Livello 3

Il livello 3 è il livello di maggiore approfondimento per la definizione e caratterizzazione delle zone suscettibili di amplificazioni o di instabilità, perché consente di risolvere le situazioni geologiche e geotecniche complesse, ad esempio inversioni di velocità, non risolvibili con abachi o metodi semplificati, modificando sostanzialmente le carte di microzonazione di livello 1 e 2.

Il livello 3, naturalmente, richiede un impegno di risorse economiche e professionali importante, giustificato, ad esempio, nel caso di una fase di ricostruzione post-terremoto ma anche, in fase preventiva, nelle aree a più elevato rischio sismico.

Per raggiungere gli obiettivi del livello 3 occorre:

- un modello del sottosuolo affidabile;
- un evento di riferimento per le simulazioni numeriche;
- specifiche simulazioni numeriche per ottenere i parametri di amplificazione.

Il modello del sottosuolo, ossia la rappresentazione 3D con elementi quantitativi e qualitativi del sottosuolo, definisce le geometrie delle unità omoge-

nee, l'assetto strutturale, le proprietà fisico meccaniche, la presenza della falda acquifera, il limite tra copertura e *bedrock* sismico.

Il modello si costruisce attraverso indagini geologiche, geofisiche e geotecniche, che consentono di identificare le unità omogenee, attribuendo loro parametri geotecnici e geofisici.

Le indagini consistono in campagne di acquisizione di dati sismometrici, sondaggi, prove in foro e in superficie per la determinazione di profili di Vs, sismica a rifrazione, prove geotecniche in situ e in laboratorio, analisi di microtremiti.

L'evento di riferimento, il cui moto dipende dal meccanismo di sorgente, dalla magnitudo e dalle caratteristiche fisico meccaniche del mezzo attraversato (sorgente-sito), può essere quello di normativa (derivante dalla pericolosità di base definita dalla classificazione sismica, adottata dalle regioni) o scelto su base deterministica qualora siano disponibili i dati su eventi del passato e sugli effetti osservati. In questo caso, il moto (accelerogramma o spettro di risposta) andrà riferito, come previsto dalla normativa, a condizioni di suolo rigido affiorante, in assenza di effetti topografici e riportato alla base della copertura.

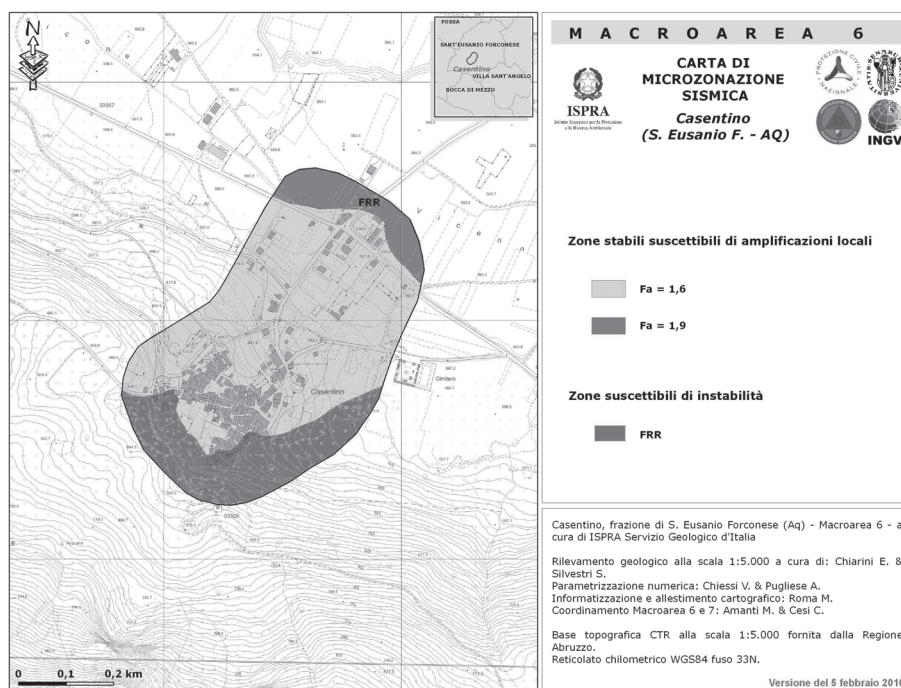


Figura 7. Esempio di carta di Microzonazione Sismica di livello 3 realizzata per la frazione Casentino, nel comune di Sant'Eusanio Forconese (AQ).

Fonte: AA. Vv., 2010.

Il modello del sottosuolo e l'input sismico sono gli ingredienti necessari allo sviluppo della analisi numeriche che consentono di simulare il processo di

propagazione delle onde attraverso il substrato e la copertura fino in superficie. Per fare questo si utilizzano codici di calcolo 1D, 2D e 3D (es. *ProShake*, *BeSoil*, *Quad*), lineari o non lineari, che tengono cioè conto delle deformazioni permanenti delle rocce, scelti in funzione del sito da analizzare e delle conoscenze disponibili. Risultato delle analisi sono i valori del parametro scelto per definire la modificazione del moto sismico, in termini di amplificazione e spettro di risposta, associati a ciascuna microzona in cui è stato suddiviso il territorio.

Le elaborazioni descritte consentono di giungere alla realizzazione di una carta di Microzonazione Sismica di livello 3, che comprende (Fig. 7):

- zone di deformazione permanente;
- zone stabili suscettibili di amplificazione caratterizzate in funzione di un parametro di amplificazione da analisi numeriche (intervalli o valore medio di FA e FV);
- zone stabili.

8. *La Microzonazione Sismica dell'area aquilana. Riflessioni conclusive*

In Abruzzo, per la ricostruzione dei centri abitati dell'area aquilana, basandosi sugli «Indirizzi e Criteri di Microzonazione Sismica», si è realizzata una MS di livello 1 e 3, per i comuni che hanno subito un'intensità macrosismica almeno pari al VII grado MCS. In particolare, le località interessate, raggruppate in 12 macroaree, sono state (Fig. 8):

- 1) L'Aquila Centro;
- 2) L'Aquila ovest (Cansatessa-Pettino-Coppito);
- 3) L'Aquila est (Tempera, Paganica, San Gregorio, Bazzano);
- 4) Poggio Picenze, San Pio delle Camere (Castelnuovo), Barisciano;
- 5) Onna;
- 6) Villa Sant'Angelo (Tussillo), Sant'Eusanio Forconese (Casentino), Fossa;
- 7) San Demetrio ne' Vestini (Stiffe), Fagnano Alto (Vallecupa, Pedicciano), Arischia;
- 8) Poggio Roio, Colle Roio, Roio Piano, Santa Rufina, Contrada Cavalli;
- 9) Bagno Grande, Bagno Piccolo, Civita di Bagno, Pianola, San Benedetto, San Felice d'Ocre, Valle-Cavalletto;
- 10) Castelvechio Subequo, Goriano Sicoli;
- 11) Collebrincioni, Ceamarda;
- 12) Navelli (Civitaretenga), Prata d'Ansidonia (San Nicandro, Tussio).

Lo studio, promosso dal Dipartimento della Protezione Civile con la Regione Abruzzo, ha visto il coinvolgimento di circa 150 ricercatori e tecnici di 10 Università italiane (L'Aquila, Chieti-Pescara, Genova, Politecnico di Torino, Politecnico di Milano, Firenze, Basilicata, Roma1, Roma3, Siena), di 8 istituti di ricerca (CNR, INGV, AGI, RELUIS, ISPRA, ENEA, OGS, GFZ-Postdam), di 4 regioni e una provincia autonoma (Abruzzo, Lazio, Emilia-Romagna, Toscana, Provincia di Trento) e dell'Ordine dei Geologi dell'Abruzzo. Il coordi-

namento del gruppo di lavoro è stato svolto dal Dipartimento della Protezione Civile.



Figura 8. Le località oggetto degli studi di Microzonazione Sismica per la ricostruzione dell'area aquilana.

L'attività è stata organizzata in 10 *task* tematici.

- *Task 1: Reperimento, archiviazione e restituzione informatica dei dati pregressi.* Sono stati raccolti, organizzati e informatizzati circa 300 log litostratigrafici di sondaggio corredati da dati geognostici in situ (SPT, CPT, ecc.). È stato costruito un sistema informativo che attraverso uno strumento WebGIS è a disposizione della Regione Abruzzo per utilizzi connessi alla futura gestione del territorio.
- *Task 2: Definizione del modello geologico-tecnico del sottosuolo e fenomeni cosmici.* Per ogni area interessata alla MS è stato condotto un rilievo geologico tecnico e sono state prodotte carte alla scala 1:5.000 e una serie di sezioni rappresentative. In queste carte sono segnalate anche le principali deformazioni cosismiche (rotture di faglie in superficie, frane sismoindotte, cedimenti differenziali).
- *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 geoelettriche.

- *Task 5: Analisi strumentali del mainshock, degli aftershock e dei microtrempi.* In tutti i siti sono stati 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 riferimento 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.
- *Task 7: Simulazioni numeriche.* Sulla scorta dei dati geologici, geotecnici e geofisici raccolti, si sono approntate, per ogni macroarea, 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, Castelnuovo, altre 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 Urbanistica e Norme Tecniche Costruzioni (NTC, 2008).* 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 (2008).
- *Task 10: Produzione di report, cartografie e diffusione dati.* Per ogni area indagata sono stati realizzati elaborati cartografici e numerici.

I risultati degli studi di MS sono riassunti per ciascuna area in tre carte:

- una carta di MS di livello 1;
- una carta di MS di livello 3 nella quale ogni zona è caratterizzata da uno spettro elastico di risposta;
- una carta dei periodi fondamentali di vibrazione.

La carta di livello 1 è stata utilizzata, in una prima fase, per l'identificazione delle aree in cui sono sorti gli edifici del progetto C.A.S.E. (Costruzioni Antisismiche Sostenibili ed Ecocompatibili), i villaggi provvisori (M.A.P.) e i moduli provvisori per uso scolastico (M.U.S.P.); in una seconda fase, questa stessa carta è stata messa a disposizione per la pianificazione urbanistica post evento. Dal punto di vista strettamente tecnico, simili carte permettono di identificare le aree che, per problematiche geologiche e geotecniche, devono essere assolutamente escluse dalla progettazione di qualsiasi opera antropica.

Le carte di livello 3 e i risultati numerici sono a supporto dei pianificatori e dei progettisti che dovranno occuparsi della ricostruzione degli edifici danneggiati.

Nel mese di gennaio 2010, per le località interessate sono state rese disponibili sul sito del Dipartimento della Protezione Civile le elaborazioni

cartografiche degli studi, ora raccolte in un volume edito dalla Regione Abruzzo e dal Dipartimento della Protezione Civile (Gruppo di lavoro MS-AQ, 2010).

Lo studio di Microzonazione Sismica dell'area aquilana è un esempio dell'importanza che il contributo della comunità scientifica ha per la costruzione di un nuovo modello di sviluppo territoriale e rappresenta l'esempio di un corretto approccio al problema della riduzione del rischio sismico. Non previsione, ma prevenzione: è questo l'unico modo per garantire nell'immediato, ma anche alle generazioni future, la protezione dagli effetti del terremoto.

Bibliografia

- AA.VV., *Studio di microzonazione sismica della Macroarea 6*, in GRUPPO DI LAVORO MS-AQ (a cura di), *Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana*, L'Aquila, DPC – Regione Abruzzo, 2010, pp. 221-276.
- GALLI P., CAMASSI R., AZZARO R., BERNARDINI F., CASTENETTO S., MOLIN D., PERONACE E., ROSSI A., VECCHI M., TERTULLIANI A., *Il terremoto aquilano del 6 aprile 2009: rilievo macrosismico, effetti di superficie ed implicazioni sismo tettoniche*, in «Il Quaternario», 22, 2009, pp. 235-246.
- GALLI P., GIACCIO B., MESSINA P., MOLIN D., *Assetto sismo tettonico e sismicità*, in GRUPPO DI LAVORO MS-AQ (a cura di), *Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana*, L'Aquila, DPC – Regione Abruzzo, 2010, pp. 3-8.
- GRUPPO DI LAVORO CPTI, *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani*, CPTI 2004, Bologna, INGV, 2004, <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI04>.
- GRUPPO DI LAVORO MS, *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*, DPC, 3 voll. e DVD, 2008.
- GRUPPO DI LAVORO MS-AQ, *Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'area aquilana*, L'Aquila, DPC – Regione Abruzzo, 3 voll. e DVD, 2010.
- IDRISS I. M., BOLTON SEED H., *An analysis of ground motions during the 1957 San Francisco earthquake*, in «Bulletin of the Seismological Society of America», 58 (6), 1968, pp. 2013-2032, <http://www.protezionecivile.gov.it>.

Abstract - The April 6th 2009 earthquake and the studies of Seismic Microzonation for the re-construction of the L'Aquila zone

During the night of April 6, 2009, a severe earthquake (Mw=6.3) struck the L'Aquila region (central Italy). In the epicentral region the death toll reached 308, most in the town of L'Aquila. The maximum intensity was 9-10 MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg scale). Most of the damage and collapses involved rubble-stone and/or masonry buildings, especially those which had been overloaded with non-collaborative R.C. roofs. After an earthquake, the observation of damages on constructions and infrastructures often highlights substantial differences in different built-up areas, even at a short distance between them. In the case of the L'Aquila earthquake, these situations were found in many localities. Often, causes are linked to the local seismic risk, determined by the different earthquake propagation or by the instability of the soil. These considerations are part of the studies of Seismic Microzonation, through which it is possible to identify and characterize stable areas, which are susceptible to local amplification, and areas subject to instability, such as landslides, surface fractures and soil liquefaction.

Keywords

L'Aquila, earthquake, seismic microzonation, seismicity.

Résumé - Le tremblement de terre du 6 avril 2009 et les études de Microzonation Sismique pour la reconstruction de l'aire de L'Aquila

La nuit du 6 avril 2009 un fort tremblement de terre (Mw=6,3) frappe le territoire de L'Aquila (Italie centrale). Dans l'aire épiscopale les victimes sont 308, la plupart dans la ville de L'Aquila. L'intensité du séisme équivaut à 9-10 degrés MCS (échelle Mercalli Cancani Sieberg). Les dégâts les plus importants et les plus intéressants concernent surtout les édifices en pierre et en maçonnerie, en particulier ceux surchargés avec des toits lourds en béton armé. Après un tremblement de terre, l'observation des dommages sur des bâtiments et sur les infrastructures met souvent en évidence des différences substantielles dans les diverses agglomérations urbaines, même dans celles séparées par des brèves distances. À l'occasion du tremblement de terre de L'Aquila, ces situations ont été observées dans plusieurs localités. La cause de cela est souvent liée à la diverse dangerosité sismique locale, déterminée par la différente propagation des vagues sismiques ou par l'instabilité du sol. Ces évaluations font partie de détaillées études sismiques, à travers lesquelles il est possible de déterminer et de caractériser les zones stables, susceptibles d'amplification locale et les zones sujettes à instabilité, comme par exemple éboulements, fractures de surface et liquéfaction du sol.

Mots-clés

L'Aquila, études sismiques, sismicité, tremblement de terre.