

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



STUDIO DELLA DISTRUTTIVITA' DEL TERREMOTO DE L'AQUILA DEL 6 APRILE 2009 E CONFRONTO COL TERREMOTO DEL CILE 2010

Relatore: Ing. Ezio FACCIOLI

Tesi di laurea di:

Anna MOTTADELLI Matr. n. 725493

Anno Accademico 2009-2010

Ringrazio mamma Carmen e papà Alberto che mi hanno dato la possibilità di percorrere il cammino universitario secondo i miei desideri permettendomi così di studiare in Portogallo per un anno e di svolgere il mio lavoro di tesi in Cile. Ciò mi ha certamente permesso di ampliare il mio bagaglio culturale non solo dal punto di vista didattico.

Ringrazio il professor Rodolfo Saragoni che mi ha seguito nel mio lavoro di tesi con entusiasmo ed interesse nonostante i numerosissimi impegni sorti in seguito al terremoto del Cile del 27 febbraio.

Ringrazio il professor Ezio Faccioli che mi ha permesso di lavorare in Cile a fianco del professor Rodolfo Saragoni e che si è sempre mostrato disponibile quando necessario.

Alla mia numerosa famiglia e ai miei amici

Abstract

In questo lavoro di tesi viene analizzata la distruttività del terremoto de L'Aquila 2009 (M_w 6,3), valore successivamente confrontato con quello del terremoto del Cile 2010 (M_w 8,8).

Sono riportate foto personali delle località colpite da entrambi gli eventi sismici; il territorio aquilano è stato visitato durante la prima settimana di settembre 2009, mentre il terremoto cileno del 27 febbraio 2010 è stato vissuto in prima persona e analizzato sul posto durante i tre mesi successivi.

Diversamente da quanto letto negli studi di altri autori, del terremoto italiano si discutono i valori del potenziale distruttivo di Araya e Saragoni delle 18 stazioni più prossime all'epicentro e viene trattato il tema delle asperità, inoltre sono presentati dei confronti tra il sisma italiano e quello cileno.

Indice

Capitolo 1: Introduzione	pag 8
Capitolo 2: Caratteristiche sismologiche del terremoto	
2.1 Introduzione	pag 10
2.2 Introduzione al terremoto	pag 10
2.3 Scossa principale	pag 13
2.4 Sequenza sismica	pag 13
2.5 Sismicità recente e storica	pag 16
2.6 Asperità	pag 18
2.7 Conclusioni	pag 22
Capitolo 3: Aspetti geologici e geotecnici	
3.1 Introduzione	pag 23
3.2 Cenni sulla evoluzione geodinamica	pag 23
3.3 Inquadramento geologico e tettonico dell'area aquilana	pag 24
3.4 Sistema di faglie di Paganica-San Demetrio nel bacino aquilano	pag 26
3.5 Spostamenti alla superficie	pag 29
3.5.1 Dati GPS	
3.5.2 Dati InSAR	
3.6 Conclusioni	pag 33
Capitolo 4: Intensità macrosismica	
4.1 Introduzione	pag 35
4.2 Tipologie edilizie e condizioni di manutenzione	pag 35
4.3 Intensità macrosismica	pag 37
4.4 Risentimento	pag 43
4.5 Conclusioni	pag 44
Capitolo 5: Danni osservati	
5.1 Introduzione	pag 46
5.2 L'Aquila (L'Aquila centro MCS 8-9)	pag 47
5.2.1 Presentazione della città	
5.2.2 Visita della città e attribuzione dei gradi di danno ad alcune costruzioni	
5.2.3 Considerazioni riguardanti il grado di intensità macrosismica attribuito a L'Aquila	
5.3 Castelnuovo (MCS 9-10)	pag 60

5.4 Monticchio (MCS 6)	pag 64
5.5 San Gregorio (MCS 9)	pag 66
5.6 Paganica (MCS 8)	pag 68
5.7 Coppito (MCS 6-7)	pag 69
5.8 Conclusioni	pag 70
Capitolo 6: RegISTRAZIONI accelerometriche	
6.1 Introduzione	pag 71
6.2 Caratteristiche geologiche e geografiche delle stazioni di registrazione	pag 71
6.3 Valori registrati	pag 76
6.3.1 Accelerogrammi	
6.3.2 Velocigrammi e sismogrammi	
6.3.3 RegISTRAZIONI e asperità	
6.4 Relazioni di attenuazione	pag 86
6.5 Spettri di risposta	pag 92
6.6 Rapporti spettrali	pag 97
6.7 Stazione AQM	pag 98
6.8 Conclusioni	pag 101
Capitolo 7: Parametri caratteristici del potere distruttivo del terremoto	
7.1 Introduzione	pag 102
7.2 Potenziale Distruttivo di Araya e Saragoni (P_D)	pag 102
7.2.1 Raccolta dati e calcolo del Potenziale Distruttivo	
7.2.2 Andamento Pd-MCS	
7.2.3 Confronto con altri terremoti italiani	
7.2.4 Importanza della densità delle stazioni di registrazione	
7.3 Intensità di Arias (I_A)	pag 113
7.4 Comparazione tra diverse grandezze rappresentative del danno	pag 113
7.5 Conclusioni	pag 116
Capitolo 8: Terremoto del Cile del 27 febbraio 2010	
8.1 Introduzione	pag 118
8.2 Presentazione del terremoto del Cile del 27 febbraio 2010	pag 118
8.3 Analisi dei dati: Spettri di risposta e Potenziale distruttivo	pag 123
8.4 Alcuni confronti tra il terremoto del 2010 e quello del 3 marzo 1985	pag 128
8.5 Osservazione dei danni nella zona epicentrale a nord dell'epicentro e a Santiago	pag 132

8.6 Comparazione tra le caratteristiche del terremoto del Cile 2010 e de L'Aquila 2009	pag 152
8.7 Conclusioni	pag 155
Capitolo 9: Commenti e conclusioni	pag 156
Appendici	
Appendice A: Scala MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg) di intensità del terremoto	pag 160
Appendice B: Classificazione del danno alle costruzioni in muratura e in CA	pag 163
Appendice C: Scheda di valutazione e censimento dei danni della Chiesa di Santa Maria del Suffragio a L'Aquila	pag 165
Appendice D: Accelerogrammi, velocigrammi e sismogrammi delle stazioni AQA, AQK, AQG, AQM, AQV e GSA e rapporti spettrali delle stazioni della valle dell'Aterno	pag 166
Indice delle figure	pag 174
Indice delle tabelle	pag 180
Bibliografia	pag 182
Siti internet	pag 188
Persone contattate	pag 189

1 Introduzione

Il 6 aprile 2009 un terremoto di magnitudo momento 6,3 ha colpito l'area dell'aquilano in centro Italia.



Figura 1.1. Casa a San Gregorio, nell'aquilano, Italia (foto di inizio settembre 2009)

Nella prima parte dell'elaborato si è presentato un quadro generale della scossa dal punto di vista sismologico (capitolo 2), si è parlato delle zone colpite dal punto di vista geologico e geotecnico (capitolo 3) ed è stato introdotto il tema dell'intensità macrosismica attribuita dall'INGV ad ogni località colpita (capitolo 4). Successivamente si sono analizzate le registrazioni accelerometriche (capitolo 6) prestando particolare attenzione all'analisi dei valori indicativi della distruttività del terremoto, in modo specifico il valore del potenziale distruttivo di Araya e Saragoni (P_D) (capitolo 7) per poterli confrontare ai danni osservati in prima persona durante la prima settimana di settembre 2009 in diverse località che hanno presentato livelli di danno differenti (capitolo 5). In Abruzzo sono stati visitati L'Aquila, Castelnuovo, Monticchio, San Gregorio, Paganica e Coppito.

Questo evento sismico è molto importante a livello mondiale in quanto è stato registrato da numerosi strumenti (ben 57 stazioni italiane, 5 delle quali si trovano sulla proiezione della faglia in superficie); i registri non si trovavano nei luoghi più danneggiati quindi non sono direttamente indicativi del maggior livello di scuotimento del suolo possibile su territorio italiano.

E' stato trattato il tema delle asperità poichè è significativo per l'analisi dei danni: l'intensità del danno può essere influenzata dalla vicinanza alle asperità. Sul piano di faglia responsabile del terremoto de L'Aquila sono state individuate due asperità principali.

Il 27 febbraio 2010 un terremoto di magnitudo 8,8 ha colpito la zona centro sud del Cile.



Figura 1.2. Costruzione a Pichidegua, nella zona epicentrale, Cile (foto di inizio marzo 2010)

Si è avuto il pregio di trovarsi a Santiago del Cile a febbraio 2010 e quindi di vivere in prima persona l'interminabile scossa del 27 febbraio; si è quindi scelto di dedicare un intero capitolo (capitolo 8) ad una prima analisi del grande terremoto cileno, nonostante per ora vi siano pochi dati a disposizione in quanto si necessita maggior tempo per digitalizzare le registrazioni accelerometriche e per studiare maggiormente le caratteristiche di questo terremoto recente.

Vengono presentati i danni osservati a Santiago nei giorni successivi al terremoto, ed i danni nella zona epicentrale visitata durante una spedizione di gruppo nei primi giorni di marzo, nella quale si aveva l'obiettivo di stabilire il valore dell'intensità macrosismica delle località visitate, per stendere poi il report ufficiale a riguardo (documento: Astroza et al., 2010).

Infine sono stati confrontati il terremoto italiano del 2009 e quello cileno del 2010, notando che la differenza della magnitudo implica differente durata della scossa e dimensioni della faglia, però non necessariamente un livello di danno proporzionato al valore della magnitudo.

2 Caratteristiche sismologiche del terremoto

2.1 Introduzione

In questo capitolo vengono presentate le caratteristiche sismologiche del terremoto che ha colpito l'aquilano il 6 aprile 2009.

In primo luogo si presentano le caratteristiche principali del sisma, in seguito viene fatta un'analisi della scossa principale avvenuta alle ore 1:32:39 del 6 aprile, con magnitudo 6,3 ed epicentro 42,348 N e 13,380 E, ad una profondità di 9,5 km. Successivamente viene analizzata la sequenza sismica che ha seguito la scossa principale e si presenta la sismicità storica della regione a partire dall'anno 1315.

Infine viene trattato il tema delle asperità della sorgente sismica, importante in quanto parzialmente correlato alla tematica del danno alle costruzioni.

2.2 Introduzione al terremoto

Il 6 aprile 2009, alle ore 01:32:40 UTC, è avvenuto un terremoto con M_w 6,3 in Abruzzo (Italia centrale) (figura 2.1), vicino a L'Aquila, una città di 68.500 abitanti (dati censimento del 2001). Sono morte 305 persone a causa del collasso di molte costruzioni residenziali e pubbliche, e ci sono stati danni diffusi in città e nei comuni vicini.

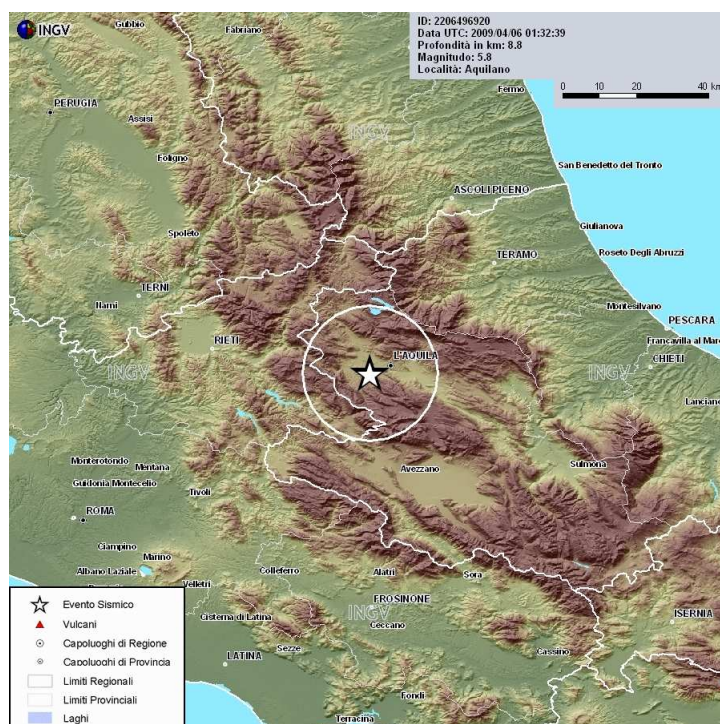


Figura 2.1. Localizzazione dell'evento sismico del 6 aprile 2009, L'Aquila

Secondo le norme italiane (NTC 2008), l'area colpita dal terremoto de L'Aquila è classificata come zona caratterizzata da un alto livello di rischio sismico (Gruppo di Lavoro MPS, 2004). In termini di probabilità,

l'accelerazione di picco del moto del suolo (PGA) ha una probabilità del 10% di superare in 50 anni il valore di $2,55 \text{ m/s}^2$.

Il terremoto è avvenuto ad una profondità di 9,5 km lungo una faglia normale orientata in direzione appenninica (NW-SE) con l'angolo di immersione verso SW, localizzata sotto la città de L'Aquila (figura 2.2). La massima intensità osservata è IX-X nella scala MCS e i danni più rilevanti sono distribuiti in direzione NW-SE. Questo evento rappresenta il terzo maggior terremoto registrato da strumenti strong-motion in Italia, dopo quello del 1980 in Irpinia (M_w 6,9) e quello del 1976 in Friuli (M_w 6,4).

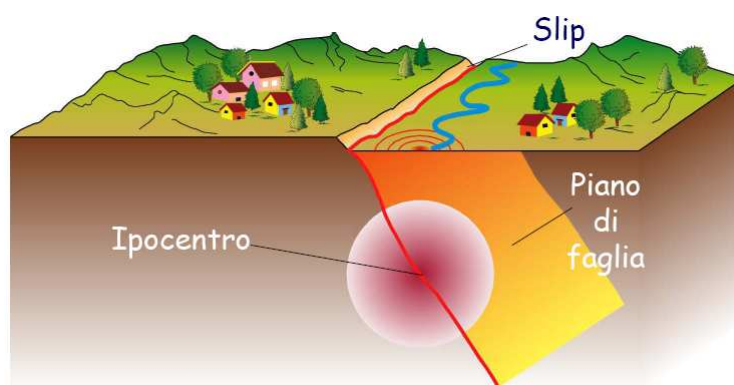


Figura 2.2. Schematizzazione della sorgente del terremoto: faglia normale di Paganica, responsabile della scossa principale del 6 aprile 2009

Dopo la scossa principale vi sono state sette repliche con $M_w \geq 5$, le due più forti avvenute il 7 aprile ($M_w = 5,6$) e il 9 aprile ($M_w = 5,4$). La scossa principale e le repliche sono stati registrati da parecchie stazioni digitali della Rete Accelerometrica Nazionale (RAN), gestita dal Dipartimento della Protezione Civile (DPC) (Fonte dei dati: ITACA, sito <http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet/>).

Sono state ottenute 56 registrazioni entro 280 km dall'epicentro. Nella regione prossima alla faglia si è registrata un'accelerazione di picco orizzontale (PGA orizzontale) compresa tra $3,27$ e $6,46 \text{ m/s}^2$, quest'ultimo rappresenta uno dei valori massimi registrati in Italia. Questo insieme di dati, costituito da 954 accelerogrammi di eventi con $M_w > 4$, è unico in Italia in quanto è interamente digitale e include osservazioni da distanze prossime alla faglia, fino ad alcune centinaia di chilometri. L'importanza di questo insieme di dati tutti digitali di ottima qualità, non è soltanto a livello nazionale, ma contribuisce in modo significativo a colmare una lacuna nella distribuzione magnitudo-distanza dei dati strong motion mondiali, utilizzati per derivare le equazioni predittive del moto del suolo, soprattutto per quanto riguarda gli eventi con meccanismo di faglia normale.

L'area colpita dal terremoto, localizzata nella zona appenninica del Lazio-Abruzzo, sta subendo un'estensione in direzione SW-NE dal periodo del Pliocene. A questo si deve la presenza di faglie normali attive in direzione NE e SW lungo tutta la catena appenninica.

In quest'area sono stati registrati eventi deboli e moderati negli ultimi 20 anni, concentrati principalmente nella crosta superiore con profondità ipocentrale di circa 15 km. Vi sono però documenti riguardanti terremoti storici distruttivi dal 1300 a.C.; i tre eventi maggiori sono avvenuti nel 1349 (intensità MCS massima: IX-X), 1461 (X) e 1703 (X).

La faglia causa dell'evento principale (faglia di Paganica, figura 2.5) è associata alla depressione tettonica della valle del fiume Aterno, situata tra due dorsali calcaree, quella del Velino-Silente a sud-ovest e quella del Gran Sasso a nord-nordest. La faglia di Paganica è stata identificata da indagini geologiche di superficie. Sono stati in particolare identificati tre segmenti orientati NW-SE; quello più a nord (lungo 1,3 km) è localizzato tra l'area est di Collebrincioni e Vallone delle Grotte (a nordest di Tempera), il segmento centrale è situato nell'area di Paganica (lungo 2,3 km) e termina verso sudest lungo la strada che connette Paganica a Pescomaggiore, il segmento più a sud (lungo 3,2 km) si estende da nordovest da San Gregorio (gruppo EEFIT, 2009).

Oltre ad aver ucciso 305 persone e ferite 1500, il terremoto ha distrutto o danneggiato circa 10.000-15.000 costruzioni, provocato un'evacuazione temporanea di 70.000-80.000 residenti e lasciato più di 24.000 persone senza casa. Sono stati colpiti un totale di 81 paesi, 49 dei quali hanno presentato un'intensità macrosismica MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg) tra grado VI e X.

La popolazione della provincia de L'Aquila include 14 comuni come Onna, Paganica e Tempera. L'insieme della popolazione dei 48 paesi elencati nella dichiarazione ufficiale dei danni del terremoto è di 60.352 persone. La maggior parte dei paesi hanno tra i 1.000 e i 3.000 cittadini.

Il terremoto è avvenuto quando la maggior parte della gente stava dormendo. La localizzazione delle 305 vittime è illustrata in figura 2.3. I decessi sono concentrati nei due gruppi di persone tra i 20 e i 29 anni e sopra i 70 anni. Il picco di vittime tra i 20 e i 29 anni è stato causato dal collasso della casa dello studente a L'Aquila (Fonte: EERI Special Earthquake Report - giugno 2009).

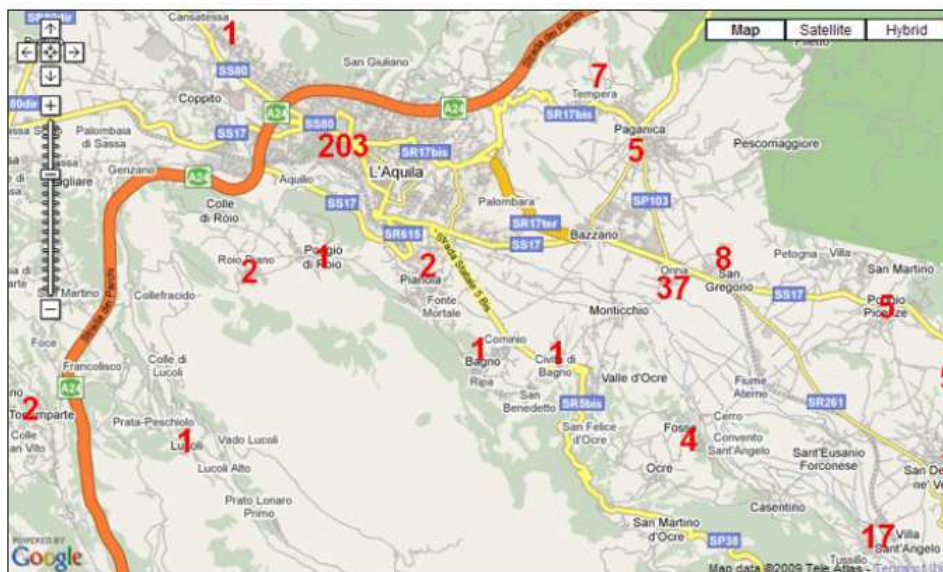


Figura 2.3. L'area de L'Aquila e la localizzazione delle morti

Molti dei beni monumentali della regione sono stati seriamente danneggiati o distrutti, incluse alcune chiese romane, dei palazzi e altri monumenti medioevali e rinascimentali. I centri storici dei paesi della valle del fiume Aterno a sud de L'Aquila (Onna, Paganica e Castelnuovo) sono stati praticamente distrutti, con un'intensità MCS pari o superiore al grado IX.

Diversamente, i danni non hanno superato un grado di intensità MCS superiore al VI a nord-ovest de L'Aquila. La concentrazione dei danni a sud-est probabilmente riflette la combinazione della direttività della rottura con gli effetti di amplificazione sismica causata dalla litostratigrafia.

2.3 Scossa principale

L'evento sismico principale ha avuto inizio il 6 aprile 2009 alle ore 01:32:39 (UTC) ed è stato registrato dalla Rete Sismometrica Nazionale Centralizzata, gestita dal Centro Nazionale Terremoti (CNT) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). Nella tabella 2.1 vi sono riportati i parametri riguardanti il terremoto.

Tabella 2.1. Parametri della scossa principale e dei principali eventi secondari (Fonte : INGV)

Date	Hour (UTC)	Lat. (N)	Long. (E)	Depth (km)	M _w
2009/03/30	13:38:38	42.326	13.362	10.6	4.4
2009/04/06	01:32:39	42.348	13.380	9.5	6.3
2009/04/07	17:47:37	42.275	13.464	15.1	5.6
2009/04/09	00:52:59	42.484	13.343	15.4	5.4

Il meccanismo focale mostra che l'evento è avvenuto lungo una faglia normale orientata NW-SE (azimut 147 gradi) con immersione SW < 50 gradi, quindi la direzione è la stessa di molte delle principali strutture tettoniche visibili in superficie; come mostrato in figura 2.5.

2.4 Sequenza sismica

Il terremoto del 6 aprile 2009 è stato l'evento maggiore di una sequenza sismica che ha avuto inizio alcuni mesi prima e ha avuto il pre-evento più significativo il 30 marzo 2009.

La sequenza delle repliche (figura 2.4: sequenza sismica dell'aquilano, dati da ISIDE: Italian Seismological Instrumental and Parametric Data-Base, localizzazione dell'epicentro tratta il 16 luglio 2009 dal sito dell'INGV) identifica chiaramente due aree principali di frattura crostale: l'area principale in cui è avvenuta la scossa principale del 6 aprile e una seconda area associata ad un'altra struttura tettonica, probabilmente di dimensioni minori, in cui è avvenuto il terremoto del 9 aprile (zona di Campotosto). Anche quest'altra struttura mostra un movimento estensionale lungo un piano orientato nella direzione degli Appennini e un'immersione verso SW di circa 50 gradi. Il terremoto del 7 aprile è avvenuto ad una profondità maggiore

degli altri due eventi. Sia il terremoto del 7 aprile che quello del 9 aprile sono considerati eventi scatenanti e non repliche di quello principale del 6 aprile (Di Capua et al., 2009).

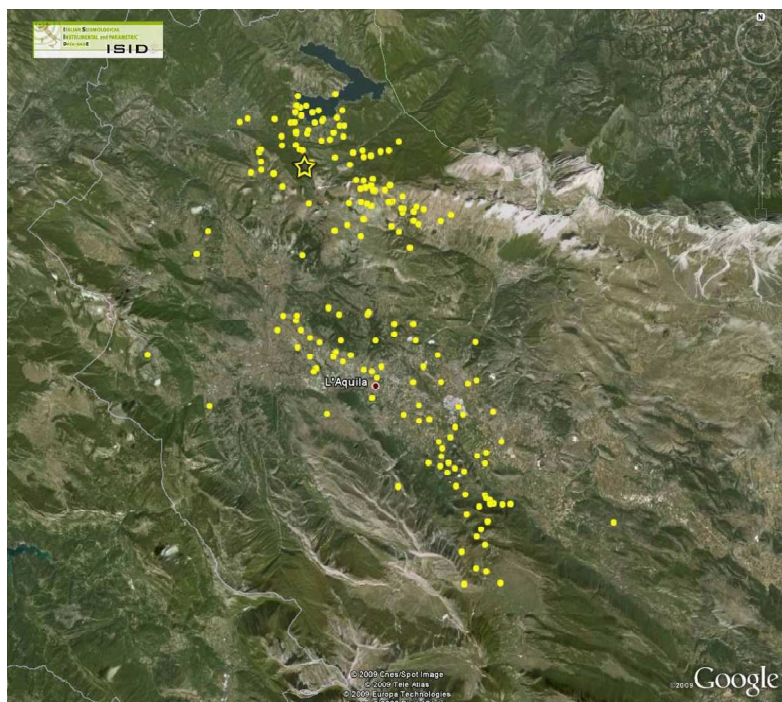


Figura 2.4. 9 aprile 2009; un secondo evento avvenuto vicino al lago di Campotosto il 9 aprile, la localizzazione è indicata con la stella gialla (Fonte: ISIDE)

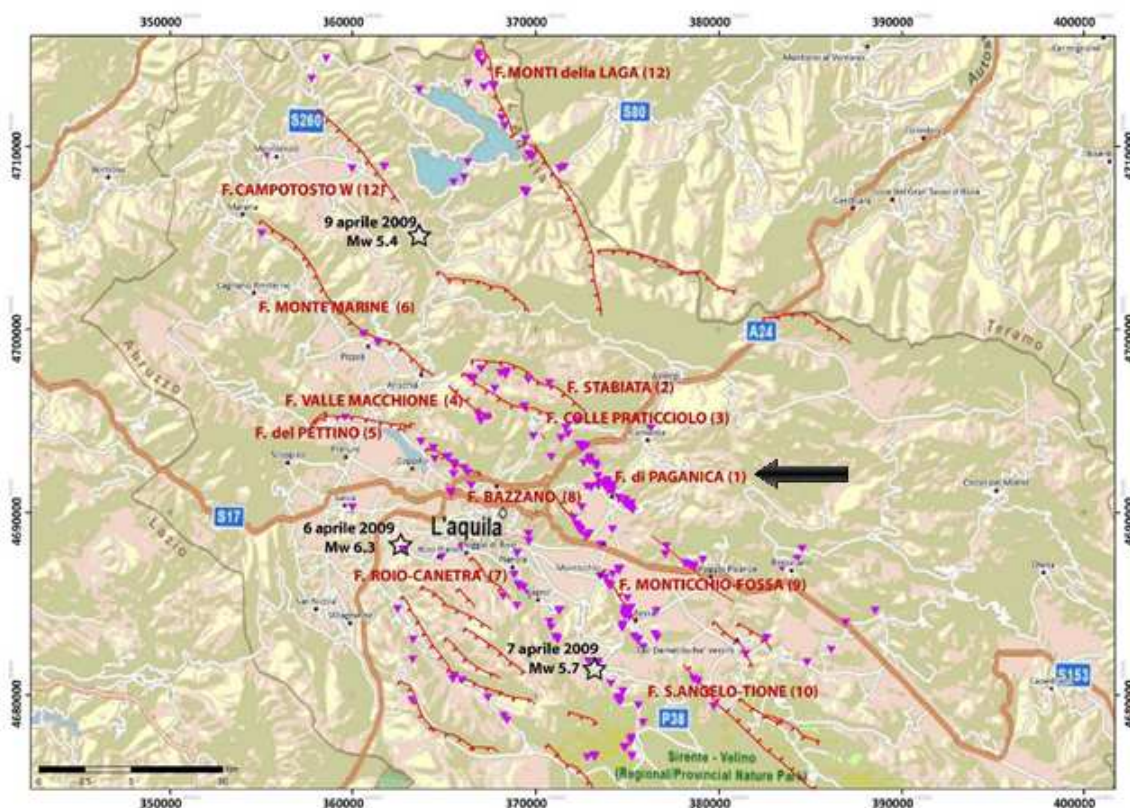


Figura 2.5. Faglie attive nell'area de L'Aquila e localizzazione dei tre eventi principali della sequenza sismica attiva (gruppo di lavoro Emergeo, 2009); i triangoli viola indicano i punti in cui i geologi dell'Emergeo hanno osservato fenomeni cosismici, in particolare fratture del suolo. La freccia nera indica la faglia di Paganica, causa dell'evento del 6 aprile

Come già detto, il terremoto del 6 aprile è stato preceduto da una sequenza con epicentri localizzati ad una profondità tra gli 8 e i 12 km, apparentemente non sono stati causati movimenti significativi sui piani di faglia ma concentrati all'interno della crosta prevalentemente lungo un angolo piccolo.

In figura 2.6 si nota che la maggior parte delle repliche si trovano sul piano di faglia ed è evidente la direzione NW-SE dell'insieme degli epicentri delle repliche. Prestando attenzione alla disposizione degli epicentri in profondità si nota che si dispongono tutti lungo il piano di faglia.

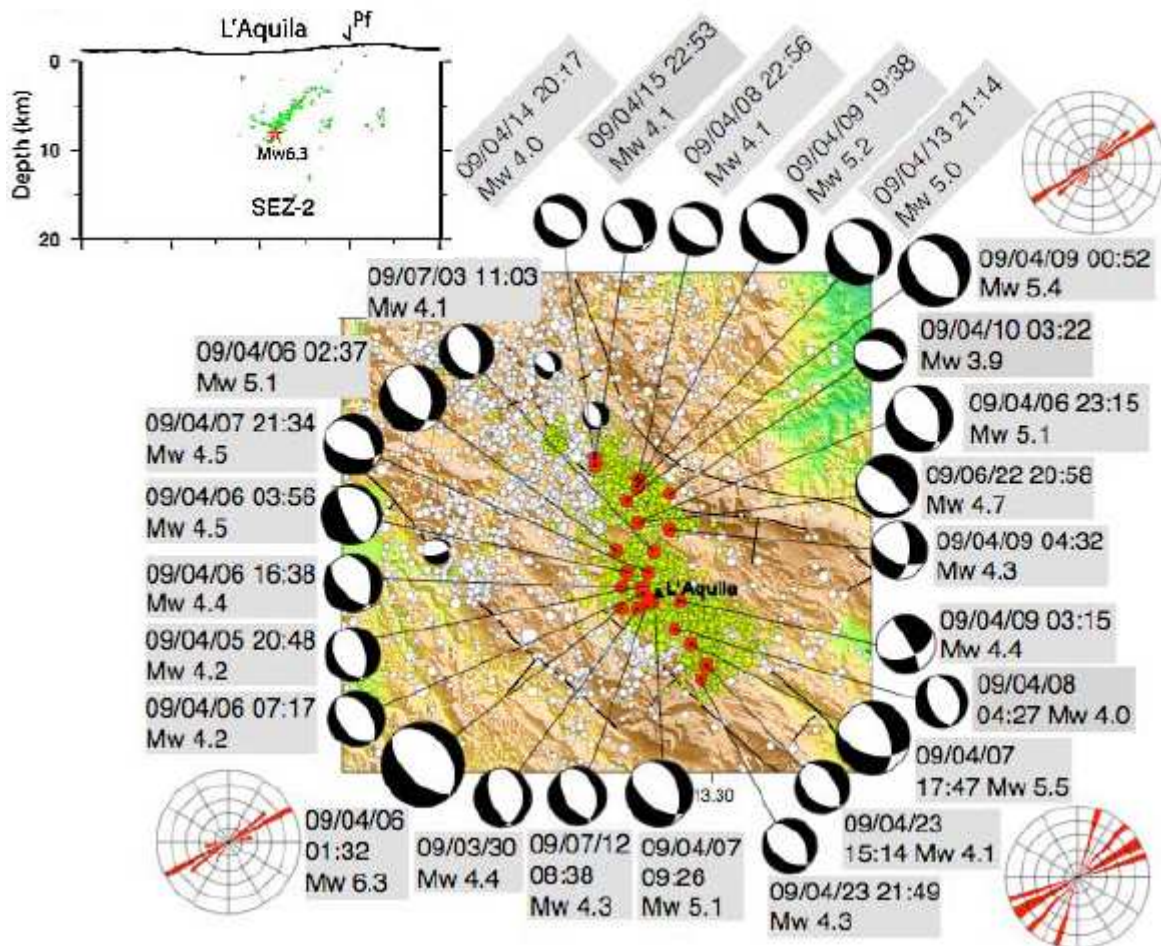


Figura 2.6. Disposizione degli epicentri dei pre-eventi e dei post-eventi in superficie (immagine più grande), disposizione degli epicentri in profondità (immagine in alto a sinistra) (fonte: INGV)

2.5 Sismicità recente e storica

Il terremoto è avvenuto in una zona dell'Appennino centrale che ha avuto una bassa attività sismica tra il 1980 e il 2008 ed è situato tra due aree con un livello di attività maggiore: l'Umbria-Marche a nord-ovest e il Lazio-Molise a sud-est. La figura 2.7 mostra la mappa e una sezione trasversale dell'area contenente L'Aquila, con le localizzazioni degli ipocentri dei terremoti degli ultimi anni. I punti rossi indicano gli ipocentri degli eventi della sequenza sismica, e le stelle indicano i tre principali eventi del 6, 7 e 9 aprile 2009. Quindi la sequenza del 2009 si è presentata in un'area in cui le caratteristiche sismiche lasciavano supporre che gli eventi sismici fossero probabili, anche se non prevedibili.

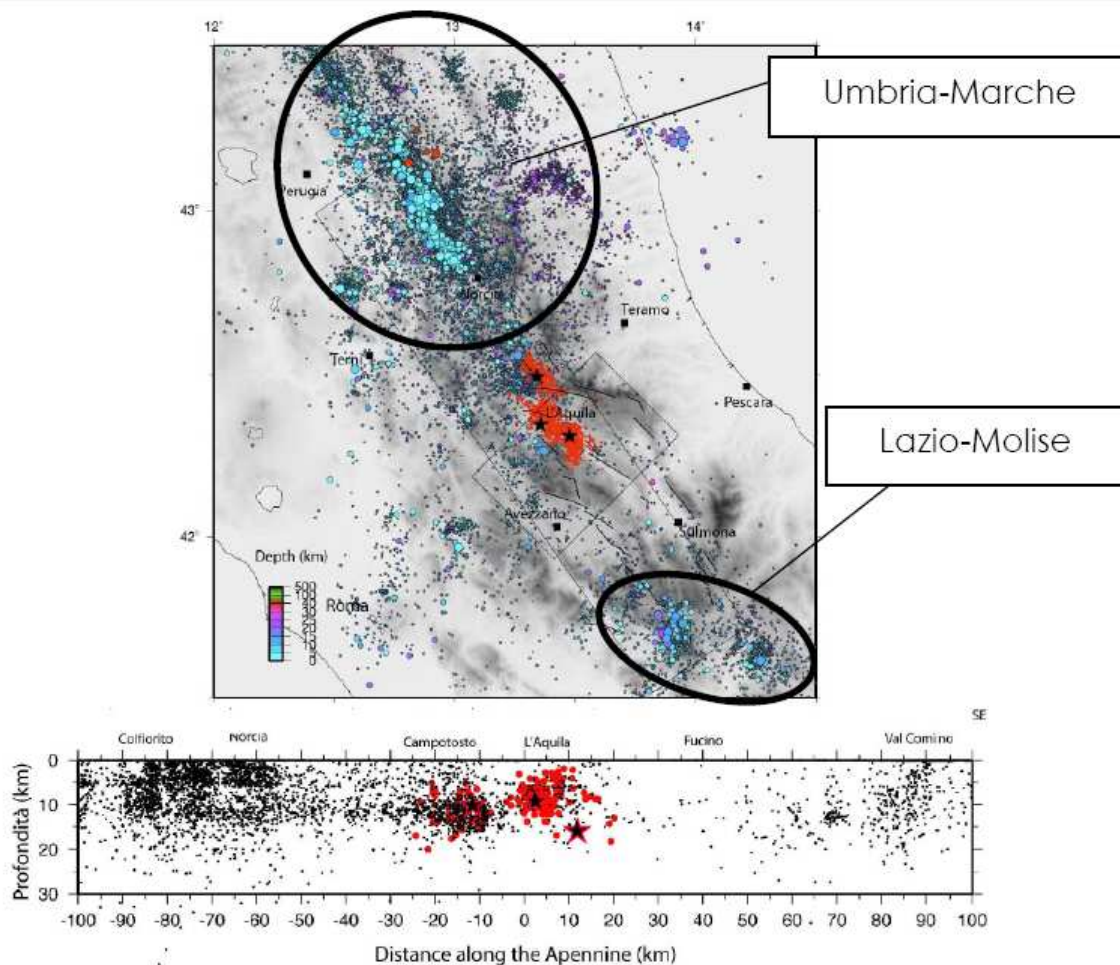


Figura 2.7. Sismicità nell'Appennino centrale negli anni tra il 1980 e il 2008 e localizzazione degli eventi della sequenza sismica attiva (Cocco, Chiarabba e De Gori, 2009)

L'alto rischio sismico dell'area de L'Aquila è conosciuto da diverso tempo, grazie agli studi sismici storici che hanno messo in evidenza numerosi terremoti importanti (figura 2.8) (Rovida et al., 2009).

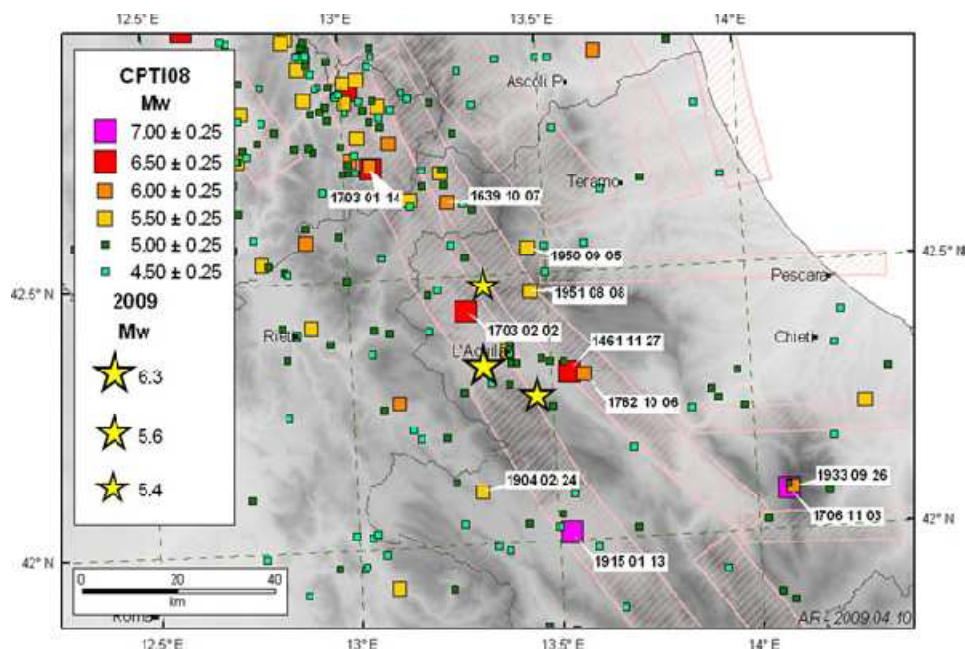


Figura 2.8. Sismicità storica degli Appennini centrali vicino a L'Aquila (Rovida et al.,2009)

Questi eventi sono presenti nel Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 4 (Gruppo di Lavoro CPTI,2004). I terremoti più significativi dell'area sono: 1315 ($M_w \geq 6,7$), 1349 ($M_w \geq 6,5$), 1461 ($M_w \geq 6,5$), 1703 ($M_w \geq 6,7$) e 1915 ($M_w \geq 7,0$).

A parte un forte evento del 1315 (noto solo attraverso poche fonti ed attualmente parametrizzato con $M_w=5,6$ in Gruppo di Lavoro CPTI, 2008; da ora CPTI08), il primo terremoto ad arrecare gravissimi danni a L'Aquila ed effetti non bene quantificabili in alcuni paesi del reatino e della conca peligna fu appunto quello del 1349 ($M_w=6,5$ in Gruppo di Lavoro CPTI, 2004 – da ora CPTI04; ma vedi in CPTI08, dove con gli stessi dati di base è stato rivisto a $M_w=5,9$). Questo evento è stato in realtà multiplo, con diverse aree epicentrali, la più importante delle quali presso Venafro (Galli e Naso, 2009); quella aquilana, molto complessa, con danni tra Sulmona, L'Aquila e la Valle del Salto resta di dubbia comprensione, specie per quanto attiene alla sorgente sismogenetica.

Il successivo evento del 1461 colpì duramente gli stessi paesi distrutti dal terremoto del 2009, ed in particolare Onna, Poggio Picenze e Sant'Eusanio Forconese (X MCS), L'Aquila (IX), sino al lontano Castelvechio Subéquo (VIII). Similmente al terremoto del 2009, quello del 1461 fu caratterizzato da una lunga sequenza sismica durata mesi. Questo è uno dei principali eventi che ha colpito la città de L'Aquila, ha prodotto effetti macrosismici nella stessa area di massima intensità del terremoto del 2009. L'area di massima intensità era localizzata tra la città de L'Aquila e il centro di Paganica, passando per Onna. Questo evento ha caratteristiche geografiche e parametriche simili a quelle del terremoto del 6 aprile 2009, dato che ha avuto un livello massimo di intensità di X MCS e una magnitudo stimata pari a $M_w=6,5$ simile all'evento del 6 aprile con $M_w=6,3$.

Nuovamente l'area aquilana fu devastata dal terremoto del 2 febbraio 1703 ($M_w=6,7$), probabilmente l'evento storico più gravoso per l'Appennino umbro-abruzzese insieme alla scossa del 14 gennaio dello

stesso anno, localizzata in area nursina ($M_w=6,7$). In quell'occasione a L'Aquila l'intensità è stata stimata del IX grado MCS, mentre molti dei paesi più duramente colpiti dal terremoto del 2009 ebbero effetti valutabili con intensità tra l'VIII ed il IX MCS (per esempio Poggio Picenze, San Gregorio, Sant'Eusanio Forconese, Paganica, Bazzano, Onna, Santa Rufina e Tempera), ivi compreso Castelnuovo che raggiunse il X grado MCS.

Un ultimo terremoto distruttivo in due località fortemente danneggiate nell'aprile 2009 avvenne il 6 ottobre del 1762 (Castelnuovo IX-X MCS e Poggio Picenze IX), anche se l'elevata intensità in queste due località mal si comprende osservando i bassi valori dei paesi vicini o la scarsità o assenza di notizie per tutti gli altri limitrofi.

Infine, un altro evento sismico con origine locale, a parte i due accaduti nel 1786 e nel 1791 (con possibili effetti a L'Aquila di VII e VII-VIII), occorse il 24 giugno del 1958 con M_w circa 5. Il terremoto ebbe effetti di VII grado in alcuni degli stessi paesi ora gravemente danneggiati (Onna e Bazzano), oltre che a San Demetrio ne' Vestini e la sua area di risentimento, seppur scalata di diversi gradi, ricalca quella dell'evento del 2009 (Di Capua et al., 2009).

2.6 Asperità

Con il termine asperità si indica una zona di un determinato segmento di faglia in cui la resistenza delle rocce alla rottura e allo scorrimento risulta maggiore (figura 2.9). Il perdurare di scorrimenti sismici e asismici, anche di lieve entità, in corrispondenza delle aree più deboli ha come risultato quello di isolare delle zone della faglia che rimangono così le uniche zone di un determinato segmento di faglia a non aver subito uno scorrimento. Sull'asperità si concentrano quindi tensioni di taglio elevate fino a quando viene superata la resistenza massima delle rocce e l'asperità cede: il risultato è, solitamente, un terremoto. Molto spesso il quadro è assai più complicato, in quanto su uno stesso tratto di faglia possono essere presenti più asperità, il cui cedimento in rapida successione può dar luogo ad eventi sismici multipli.



Figura 2.9. Rappresentazione schematica del concetto di asperità su di un piano di faglia (Ruiz, 2007)

Il concetto di asperità è stato concepito partendo dall'ipotesi che le modalità con cui si manifesta l'attività sismica di un'area siano fortemente dipendenti dalle irregolarità della faglia sismogenetica, in corrispondenza delle quali sia l'attrito sia le tensioni sono più elevati.

Le irregolarità presenti lungo una superficie di faglia interessano aree limitate rispetto alle dimensioni complessive della faglia. Ciò lascia presupporre che esistano almeno due diversi meccanismi responsabili della formazione dei terremoti, come sembrerebbero dimostrare gli studi sulla distribuzione delle repliche (aftershocks) e dei precursori (foreshocks). Questi ultimi, in particolare, sarebbero rappresentativi di un progressivo e rapido indebolimento delle asperità intatte a causa della concentrazione su di esse delle tensioni agenti.

E' certo che la resistenza d'attrito svolga un ruolo importante all'interno del meccanismo che è all'origine dei terremoti. Inoltre proprio grazie alle prove di laboratorio, è stato possibile evidenziare come il piano di faglia sia interessato da zone di elevata resistenza costituite, per l'appunto, dalle asperità, la cui distribuzione lungo il piano di faglia varia anche in funzione delle condizioni geotettoniche locali. Le asperità corrispondono a rugosità in grado di accumulare tensioni maggiori; durante un terremoto esistono differenti asperità di differenti dimensioni e forme. In figura 2.10 sono rappresentate tre diverse distribuzioni di asperità lungo una faglia inclinata: in a) c'è una notevole area di contatto tra le due pareti della faglia; in b) lo sforzo è concentrato su una sola asperità (indicata dalla freccia); in c) lo sforzo è trasmesso da una parete all'altra solo dalla breccia di faglia.

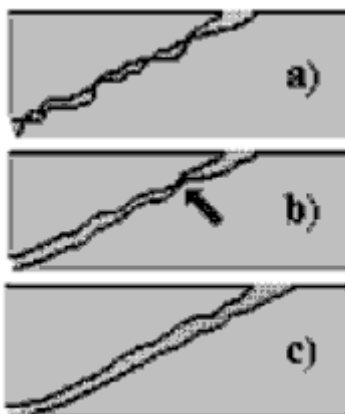


Figura 2.10. Diverse distribuzioni di asperità lungo una faglia inclinata (Ruiz, 2007)

Nel modello ad asperità gli sforzi si concentrano sull'asperità quindi la rottura inizia da questo punto di maggiore resistenza per propagarsi, successivamente, alle zone relativamente più deboli.

L'immagine 2.11 è stata prodotta usando l'inversione non lineare delle registrazioni accelerometriche e dei dati GPS; nella figura sono evidenti le due possibili asperità che si trovano sul piano di faglia che ha causato il terremoto del 6 aprile; inoltre è mostrato il modello della superficie di faglia, le cui caratteristiche sono riportate nella tabella 2.2 (Piatanesi e Cirella, 2009); questa elaborazione è da considerarsi preliminare in quanto è stata resa disponibile già due settimane dopo la scossa del 6 aprile.

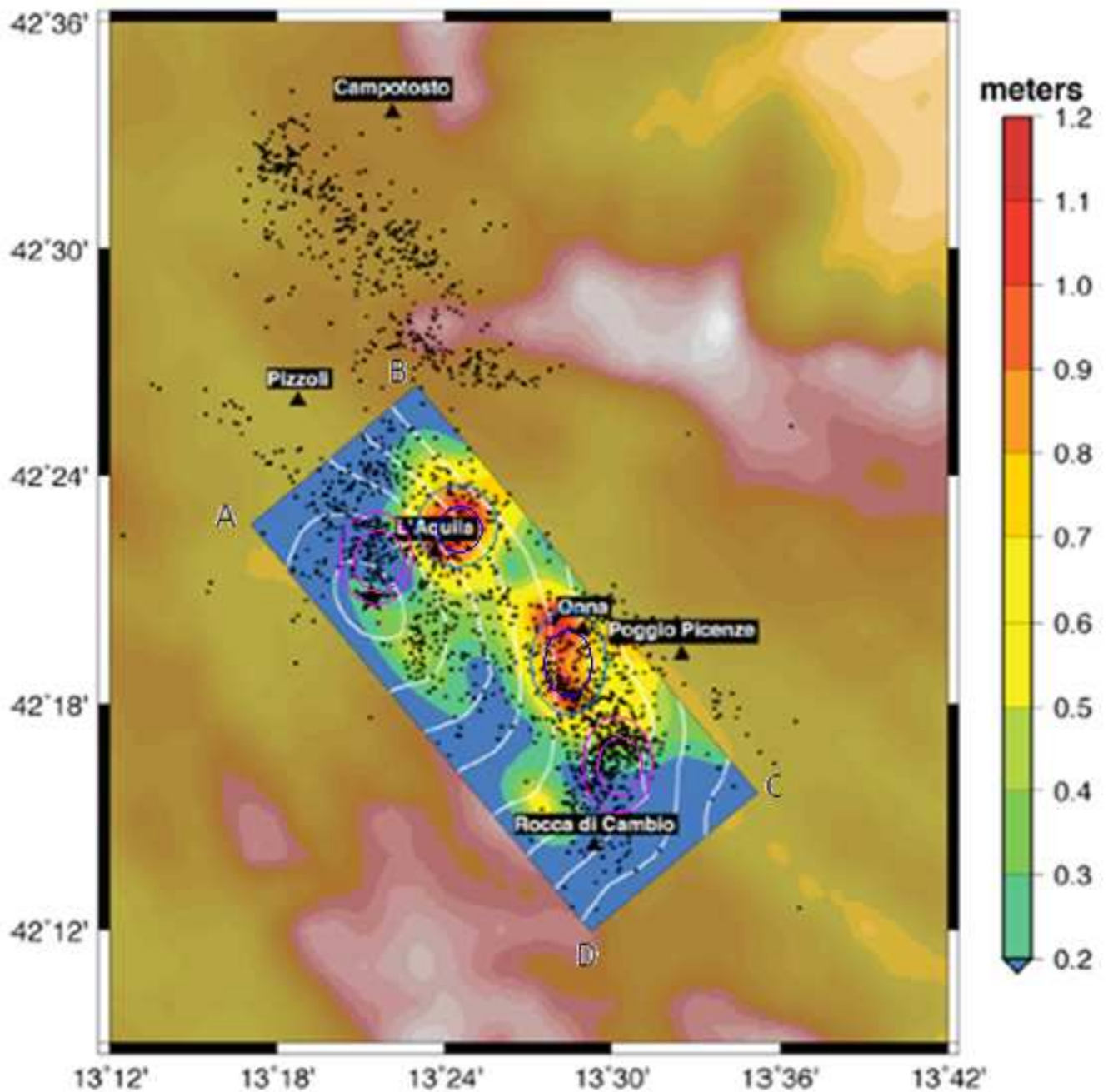


Figura 2.11. Modello della proiezione della superficie di faglia in superficie. I colori sul piano di faglia indicano la distribuzione dello scorrimento. Le linee bianche indicano la posizione della propagazione di rottura a intervalli di 1 secondo. I punti neri indicano le registrazioni delle repliche (da Piatanesi e Cirella, 2009). In blu sono state cerchiare le due aree dove si sono individuati gli scivolamenti maggiori, mentre in rosa le zone in cui si è verificata una maggior densità di repliche (Piatanesi e Cirella, 2009)

Tabella 2.2. Parametri della sorgente responsabile del terremoto del 6 aprile 2009 (da Piatanesi e Cirella, 2009)

Coordinates of the corners of the rectangular fault plane	A	Lat. (N): 42°22,71'
		Lon. (E): 13°17,14'
	B	Lat. (N): 42°26,36'
		Lon. (E): 13°23,00'
	C	Lat. (N): 42°15,64'
		Lon. (E): 13°35,14'
	D	Lat. (N): 42°11,90'
		Lon. (E): 13°29,14'
Length	26 km	
Width	11 km	
Strike	140°	
Dip	43°	

Dalla figura 2.11 si osserva che lo spostamento massimo stimato è dell'ordine di 1 m, ed è proprio dove si è verificato lo spostamento massimo che si individuano le asperità per quanto spiegato in precedenza: gli sforzi si concentrano sull'asperità quindi la frattura inizia da questo punto di maggiore resistenza, per propagarsi successivamente alle zone relativamente più deboli.

Osservando la disposizione delle repliche risulterebbe più corretto ritenere che l'asperità più a nord in realtà si trova più spostata verso ovest e la seconda asperità più a sud. Nella figura 2.11 sono stati cerchiati in blu e in rosa le zone che hanno presentato uno scorrimento maggiore e le aree con maggior concentrazione di repliche rispettivamente. Quando avviene un terremoto, il ruolo delle repliche è quello di riassetamento, di conseguenza la crosta terrestre ha maggior necessità di riassetarsi nei punti in cui era stata immagazzinata più energia, tali punti corrisponderebbero alle asperità. La localizzazione delle repliche generalmente risulta più precisa di quella dell'epicentro principale in quanto in seguito alla scossa principale vengono installati numerosi strumenti di registrazione provvisori.

La localizzazione delle repliche è anche utile per identificare meglio il piano di faglia; le repliche si trovano in generale sul piano di faglia, in particolare in corrispondenza delle asperità in quanto, come detto precedentemente, in quei punti il terreno si deve riassetare.

Preme sottolineare che le diverse immagini che rappresentano le distribuzioni dello scorrimento sono dei modelli teorici quindi non sempre coincidono poiché l'inversione dipende molto da quali dati si usano, in che numero, e da diversi altri fattori. Per esempio confrontando figura 2.11 con 6.13 (nel capitolo 6) si nota che sono state individuate due asperità in entrambi i casi, ma che le zone di massimo scorrimento non coincidono. Tenendo in considerazione le repliche, anche in figura 6.13 si individuerebbero le asperità spostate nella stessa direzione proposta per la figura 2.11.

Il tema delle asperità è importante in quanto l'entità dei danni può essere influenzata dalla distanza del luogo in considerazione da questi punti di maggior rilascio di energia.

2.7 Conclusioni

Il terremoto del 6 aprile 2009 è stato l'evento meglio registrato nella storia sismica italiana, esso ha un'importanza rilevante non solo a livello nazionale ma anche mondiale, essendo state ottenute ben 56 registrazioni entro 280 km dall'epicentro. Questo evento rappresenta il terzo maggior terremoto registrato da strumenti strong-motion in Italia, dopo quello del 1980 in Irpinia (M_w 6,9) e quello del 1976 in Friuli (M_w 6,4).

Sono state colpite dal terremoto un totale di 81 località, 49 delle quali hanno presentato un'intensità macrosismica MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg) tra grado VI e X. Molti dei beni culturali e artistici della regione sono stati seriamente danneggiati o distrutti, incluse alcune chiese romaniche, dei palazzi e altri monumenti medioevali e rinascimentali. I centri storici dei paesi della valle del fiume Aterno a sud de L'Aquila (Onna, Paganica e Castelnuovo) sono stati praticamente distrutti, con un'intensità MCS fino al grado X. Diversamente, i danni non hanno superato un grado di intensità MCS superiore al VI a nord-ovest de L'Aquila. La concentrazione dei danni a sud-est probabilmente riflette la combinazione della direttività della rottura con gli effetti di amplificazione sismica causata dalla litostratigrafia.

A livello storico terremoti più significativi dell'area sono: 1315 ($M_w \geq 6,7$), 1349 ($M_w \geq 6,5$), 1461 ($M_w \geq 6,5$), 1703 ($M_w \geq 6,7$) e 1915 ($M_w \geq 7,0$).

Sono state individuate due possibili asperità che si trovano sul piano della faglia che ha causato il terremoto.

3 Aspetti geologici e geotecnici

3.1 Introduzione

In questo capitolo viene presentata una rassegna geologica e geotecnica degli elementi che hanno caratterizzato il terremoto del 6 aprile 2009 e la zona in cui è avvenuto. Un paragrafo è interamente dedicato al sistema di faglie coinvolte nel sisma ed in particolare la faglia di Paganica che è la principale per la scossa del 6 aprile 2009; infine sono mostrate immagini ottenute da GPS (Global Positioning System) e dati InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) che indicano gli spostamenti del terreno subito in seguito al terremoto.

3.2 Cenni sulla evoluzione geodinamica

L'area colpita dal terremoto del 6 aprile 2009 si trova nella zona centrale degli Appennini. Questa catena di montagne, che attraversa la penisola italiana per quasi tutta la sua lunghezza, è il risultato della convergenza tra la zolla tettonica africana e quella europea e la successiva collisione dei due margini continentali, un processo geodetico illustrato in figura 3.1 che ha avuto inizio nell'età del Neogene (circa 23 milioni di anni fa).

“La causa principale (...) della sismicità nell'area mediterranea è costituita dal fatto che il blocco africano e quello euroasiatico, sollecitati dall'apertura degli oceani circostanti, sono in corso di reciproco avvicinamento. La chiusura di questa gigantesca morsa causa necessariamente la riduzione dello spazio compreso tra i due blocchi. In parte il “sacrificio” viene sostenuto dal margine settentrionale africano, che scompare immergendosi sotto le zolle egea e anatolica, e in parte dalle strutture mediterranee che si deformano e si riassetano in modo da occupare uno spazio sempre più limitato” (da Mantovani, 1991).

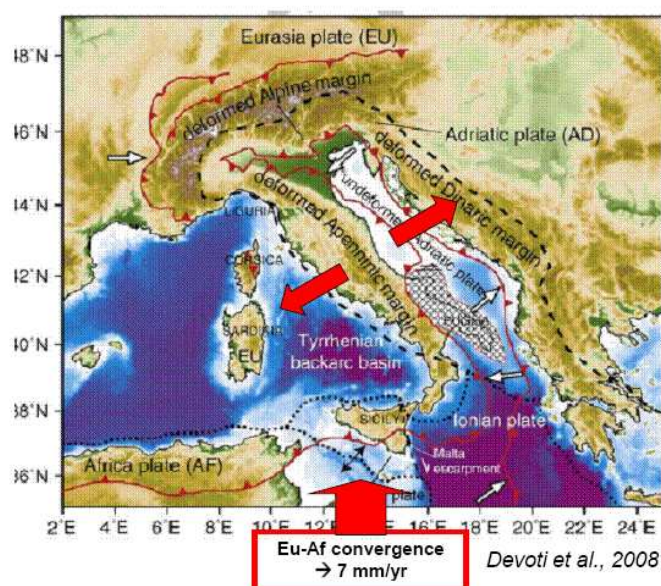


Figura 3.1. Modello geodinamico della zona centrale del Mediterraneo (Devoti et al., 2008)

La fase compressiva ha deformato significativamente gli strati estensivi dei depositi marini accumulati lungo i margini della zolla africana, trasformandoli nella catena montuosa. Le spinte orogeniche hanno agito in un modo asincrono lungo la catena appenninica, deformando questa parte di crosta terrestre dall'epoca del Miocene all'epoca del Pliocene superiore (da 24 a 3,6 milioni di anni fa) (Di Capua et al., 2009).

Il modello geodinamico più comunemente citato ed usato per descrivere i fenomeni osservabili recenti si basa su un sistema di spinte che migrano progressivamente dal Tirreno verso il fianco Adriatico. Questo sistema descrive una transizione dalla compressione continentale davanti alla catena (lato adriatico) all'estensione dietro la catena (settore tirrenico).

Lungo il margine occidentale, il regime di sforzi tettonici distensivi che accompagnano l'espansione ha dato luogo all'apertura del bacino tirrenico, che ha le caratteristiche geologiche di un oceano "giovane" (crosta sottile, flusso termico elevato) e che una decina di milioni d'anni or sono non esisteva ancora. "Questo campo di sforzi distensivi (...) ha lasciato tracce evidenti anche lungo il versante occidentale della penisola italiana (...) ed è tuttora attivo, come è indicato dal fatto che i terremoti in questa zona sono prevalentemente associati a faglie normali (cioè che separano blocchi in allontanamento reciproco)." (Mantovani, 1991).

3.3 Inquadramento geologico e tettonico dell'area aquilana

Le stazioni accelerometriche della RAN analizzate sono ubicate nella Valle del Fiume Aterno, Appennino Centrale, incassata tra i rilievi del Gran Sasso, ad est e nord-est, e i rilievi del gruppo Velino-Sirente, a sud-ovest.

Schematicamente, nell'Appennino centrale abruzzese sono riconoscibili due grandi sistemi deposizionali meso-cenozoici; il primo è rappresentato dalle piattaforme carbonatiche mesozoiche (calcarei e dolomie) con evoluzione verso ambienti di rampa carbonatica e di bacino (calcareniti e marne), che ha agito fino al Miocene medio, il secondo è costituito da potenti depositi silico-clastici (argille ed arenarie) di avanfossa, databili all'intervallo Miocene superiore-Pliocene (Bosi e Bertini, 1970). L'emersione della catena ha determinato successivamente un'intensa fase erosiva Plio-Pleistocenica. I cicli sedimentari erosivo-deposizionali hanno prodotto depositi di versante ed estesi depositi lacustri ed alluvionali che hanno colmato i bacini intrappenninici. Le fasi glaciali pleistoceniche hanno interagito con la dinamica a controllo tettonico, attraverso oscillazioni del livello di base fluviale e variazioni del regime morfo-dinamico predominante. Nella figura 3.2 è riportata una distribuzione dei depositi quaternari presenti all'interno della Valle del Fiume Aterno, che costituisce l'elemento idrografico principale di quest'area.

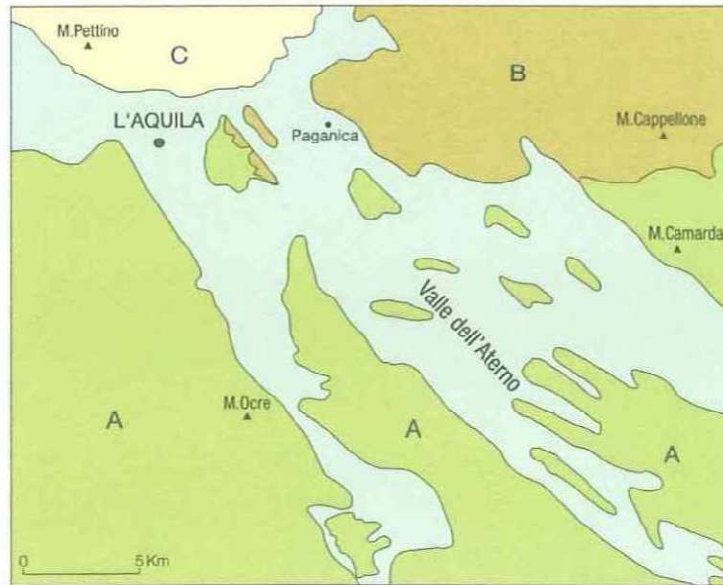


Figura 3.2. Distribuzione dei depositi quaternari (in celeste) e meso-cenozoici (in altri colori nella zone A, B e C) nella conca aquilana e nella Valle dell'Aterno (tratta dal Foglio n. 359 "L'Aquila" della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 - APAT, 2006)

Si può notare l'allungamento in direzione NW-SE di questo bacino all'interno del quale sono ubicate le località, tra cui la città di L'Aquila, e le stazioni accelerometriche interessate dal terremoto del 6 aprile.

I rilievi dell'area aquilana sono costituiti da depositi carbonatici e solo in piccola parte marnoso-arenacei meso-cenozoici (subito ad est della città di L'Aquila). I depositi quaternari occupano invece le aree più depresse e nella figura 3.2 sono distinti nella porzione pleistocenica (beige) ed in quella olocenica (celestine).

Nella zona del centro abitato de L'Aquila sono presenti estesi depositi di breccie eterometriche pleistoceniche denominate "megabreccie", a vario grado di cementazione, talora di notevoli dimensioni, anche di alcuni metri cubi, con elementi principalmente calcarei immersi in matrice sabbioso-limosa (Bosi e Bertini, 1970).

Nella Valle dell'Aterno affiorano invece depositi lacustri che formano una complessa sequenza deposizionale di unità limose e sabbioso-conglomeratiche, con frequenti variazioni laterali, soprastanti il substrato calcareo (Bosi e Bertini, 1970 e Bertini et al., 1989). I depositi più recenti (Olocene), che si rinvencono al di sopra dei terreni meso-cenozoici e Pleistocenici, sono invece costituiti da alluvioni ciottoloso-sabbiose e subordinatamente sabbioso-limose, da depositi detritici di versante, da depositi eluvio-colluviali con detriti immersi in matrice limoso-argillosa (Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 – foglio 359 "L'Aquila").

I depositi quaternari dell'area de L'Aquila sono stati depositati in depressioni morfologiche all'interno della catena emergente. Questi bacini sedimentari sono delimitati da faglie normali aventi un angolo elevato (circa 70°) con l'andamento degli Appennini che interrompono verticalmente, a diverse altezze, la

struttura orogenica. Il sistema di faglie normali ha avuto origine nel periodo del Quaternario (1,8 milioni di anni fa).

Il sistema costituito da faglie normali presente nell'area è attivo, come dimostrato da questo terremoto e dalla geomorfologia della regione.

Le attività delle strutture tettoniche, con maggiori movimenti sul lato orientale del bacino, sono inoltre evidenziate dalla presenza di elementi alluvionali del Quaternario sul lato nord-est delle depressioni. Le faglie normali, con il loro movimento, hanno prodotto un rinnovamento del rilievo nell'area a nord-est, portando ad un aumento dei processi erosivi e alla deposizione di materiale grossolano nell'area sud occidentale della valle.

3.4 Sistema di faglie di Paganica-San Demetrio nel bacino aquilano

Il contesto sismotettonico dell'area interessata dal terremoto aquilano del 6 aprile si può inquadrare nei processi estensionali che caratterizzano la deformazione della crosta appenninica ed in particolare in quelli relativi alla distensione NE-SW di questo settore di catena. Tale estensione (valutata nell'ordine dei 3 mm/anno tramite misurazioni GPS; Mantenuto et al., 2007) è accomodata da faglie normali ad andamento NW-SE ed immersione tirrenica, alle quali va ascritta tutta la maggiore sismicità dell'Appennino centrale (Galadini e Galli, 2000).

Nella regione aquilana tali faglie sono conosciute e molte di esse sono state studiate in dettaglio anche attraverso analisi paleosismologiche che ne hanno consentito la parametrizzazione in termini sismogenetici (Galli et al., 2008 e relativa bibliografia). Ad esse sono stati anche associati i forti terremoti della regione, alcuni con l'utilizzo dei dati derivanti appunto dalle analisi paleosismologiche, altri dall'associazione della distribuzione delle massime intensità rispetto all'andamento di ogni singola struttura.

Sembra utile citare lo schema di sorgenti sismogenetiche più recentemente pubblicato da Boncio et al., (2004). Tale schema include un'ipotesi di sorgente relativa al terremoto del 1461 ottenuta unendo la faglia di Paganica con quella del Monte Pettino. Attualmente la comunità scientifica tende a considerare i terremoti del 1461 e del 2009 come il risultato dell'attivazione di una sorgente la cui espressione in superficie è rappresentata dalla faglia qui ridefinita Collebrincioni-San Demetrio (PFS, Paganica Fault System, figura 3.6).

Diversamente, per esempio, dalla faglia del Monte Marzano (responsabile del terremoto irpino del 1980, Mw=6.9), ben riconoscibile in fotografia aerea per tutta la sua estensione anche prima del terremoto, le evidenze del sistema di faglie PFS sono frammentarie e limitate principalmente al solo segmento di Paganica e di San Demetrio. Anche per questo, la sua geometria, estensione ed attività erano fino ad oggi note in maniera parziale e non conclusiva. Per quanto concerne il segmento di San Demetrio (incluso nel

MAFS in Galadini e Galli, 2000), Bertini e Bosi (1993) ne evidenziano un'attività posteriore al Pleistocene Medio e, presumibilmente, di controllo all'attuale assetto geomorfologico della Valle dell'Aterno.

Le tracce di fagliazione superficiale (figura 3.3, 3.4 e 3.5) sono costituite da un insieme di fratture beanti (in genere da pochi millimetri a 3-4 cm, ma fino a 10 cm in rari casi), generalmente orientate N110°-140°. Tali fratture hanno interessato indistintamente terreni più o meno coesivi e manufatti antropici, ivi comprese strutture in cemento armato, strade, pavimentazioni varie, muri (in pietra, laterizio e cemento). La rottura di superficie, oltre a tagliare e danneggiare quanto sopra nominato, ha anche provocato la rottura per trazione nei giunti di importanti tubature di servizio a Paganica, tra cui l'acquedotto del Gran Sasso e la tubatura a media pressione del gas (rete EnelGas) (per esempio Emergeo, 2009; Falcucci et al., 2009; Lavecchia et al., 2009; Messina et al., 2009).

Nelle figure seguenti (dalla 3.3 al 3.5) sono riportati degli esempi di punti in cui si è osservata un'evidenza della faglia in superficie.



Figura 3.3, 3.4 e 3.5. Evidenza della faglia in superficie sul terreno, una strada e in una casa

Per quanto riguarda l'attività tardo quaternaria di questo sistema di faglie, si sottolinea che studi in corso, oltre ad evidenziare la forte impronta sull'evoluzione tettono-sedimentaria e morfologica dell'area, suggeriscono un tasso di scorrimento minimo a lungo termine di 0,5 mm/anno (Galli, Giaccio, Messina, Peronace).

D'altra parte, una serie di trincee paleo sismologiche, aperte in urgenza e per motivi legati all'agibilità (molti edifici temporaneamente dichiarati "inagibili" sono ubicati al di sopra od in prossimità della faglia)

degli edifici fondati lungo il segmento di Paganica, hanno mostrato rigetti cosismici dei depositi del tardo Pleistocene superiore e dell'Olocene ben più consistenti di quelli verificatisi in occasione del terremoto del 2009 e, probabilmente, del 1461 (Galli et al., 2009).

In figura 3.6 sono rappresentate in rosso le faglie attive nella zona più prossima alla città de L'Aquila. La faglia responsabile del terremoto del 6 aprile 2009 è quella di Paganica, mentre le faglie di Pettino e Bazzano (evidenziate in figura 3.6) non si sono spostate durante il terremoto. Si pone particolare attenzione a queste due faglie, non coinvolte nel sisma dell'aquilano del 2009 in quanto sono state la causa scatenante di terremoti passati e potrebbero essere responsabili di sismi futuri; in particolare per la città de L'Aquila la faglia di Bazzano risulta più pericolosa in quanto più prossima alla città.

In figura 3.7 è rappresentata una sezione verticale che mette in evidenza il sistema di faglie normali della zona vicino alla città de L'Aquila.



Figura 3.6. Faglie attive presenti nell'area dell'aquilano, nella zona più prossima alla città de L'Aquila. Sono evidenziate le faglie di Paganica, Bazzano e Pettino (Di Capua et al., 2009)



Figura 3.7. Sezione verticale della zona dell'aquilano in cui viene messo in evidenza il sistema di faglie normali. La faglia segnata in rosso è la Paganica

Nella figura 3.8 è segnata in rosso la traccia della faglia di Paganica e in nero i punti in cui sono stati osservate delle evidenze di traccia di faglia in superficie. Si nota che i due elementi sono coincidenti, considerando una zona di rispetto ampia almeno 100 metri.



Figura 3.8. In rosso è tracciata la faglia di Paganica, in nero i punti in cui si sono osservate evidenze di faglia in superficie. I due elementi, considerando una zona di rispetto di 100 m, sono coincidenti

3.5 Spostamenti alla superficie

Le deformazioni superficiali iniziali associate al terremoto del 6 aprile ($M_w=6,3$) sono state valutate utilizzando metodi geodetici inclusi l'Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) e il Global Positioning System (GPS).

3.5.1 Dati GPS

L'INGV mantiene una rete nazionale per monitorare la deformazione della crosta terrestre associata sia alla tensione tettonica che alle deformazioni collegate ai numerosi vulcani attivi in Italia.

La figura 3.9 mostra il campo di velocità pre-terremoto nella regione circostante L'Aquila basato su dati acquisiti tra il 2000 e il 2008. Questa figura mostra che i tassi di deformazione sismica maggiori sono localizzati negli Appennini centrali, raggiungono i 4 o 5 mm all'anno e generalmente sono direzionati verso NNE. A sud-ovest dell'epicentro del terremoto del 6 aprile 2009, i tassi di deformazione diminuiscono fino a circa 1 mm indicando uno sforzo estensionale verso gli Appennini. Si osserva una rotazione antioraria per il lato est degli Appennini, e una debole rotazione oraria per il lato ovest. Queste deformazioni mostrano che oltre ad una estensione, sono presenti anche deformazioni laterali attraverso il sistema di faglia degli Appennini motivando così lo scivolamento obliquo di molte delle strutture della regione.

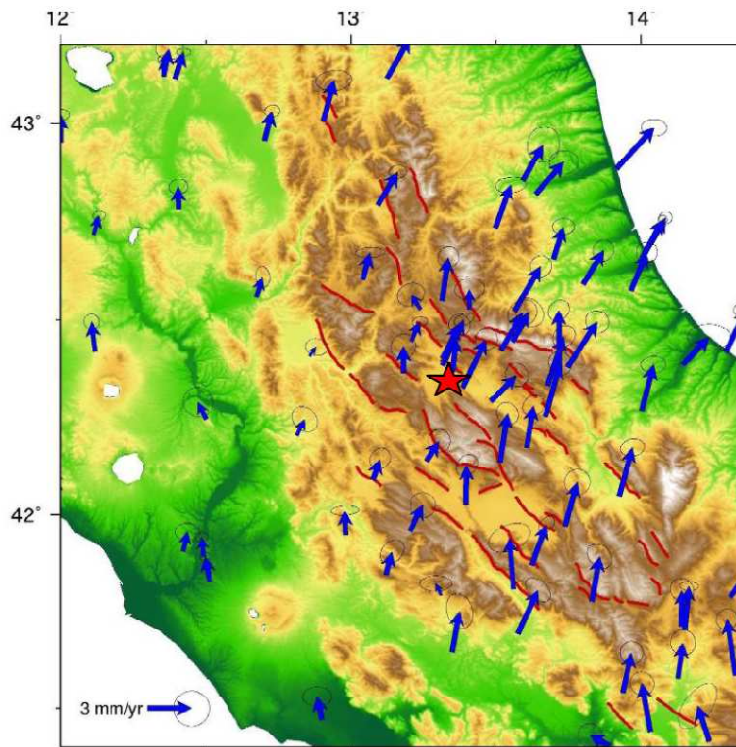


Figura 3.9. Tassi di deformazione annua nel centro Italia determinati da strumento GPS, dati acquisiti dalla rete RING GPS (INGV)

I dati GPS sono stati raccolti nei giorni successivi al terremoto per determinare il campo di movimento cosismico associato all'evento. La figura 3.10 mostra gli spostamenti nella regione epicentrale tra il 5 ed il 9 aprile (D'Agostino, 2009).

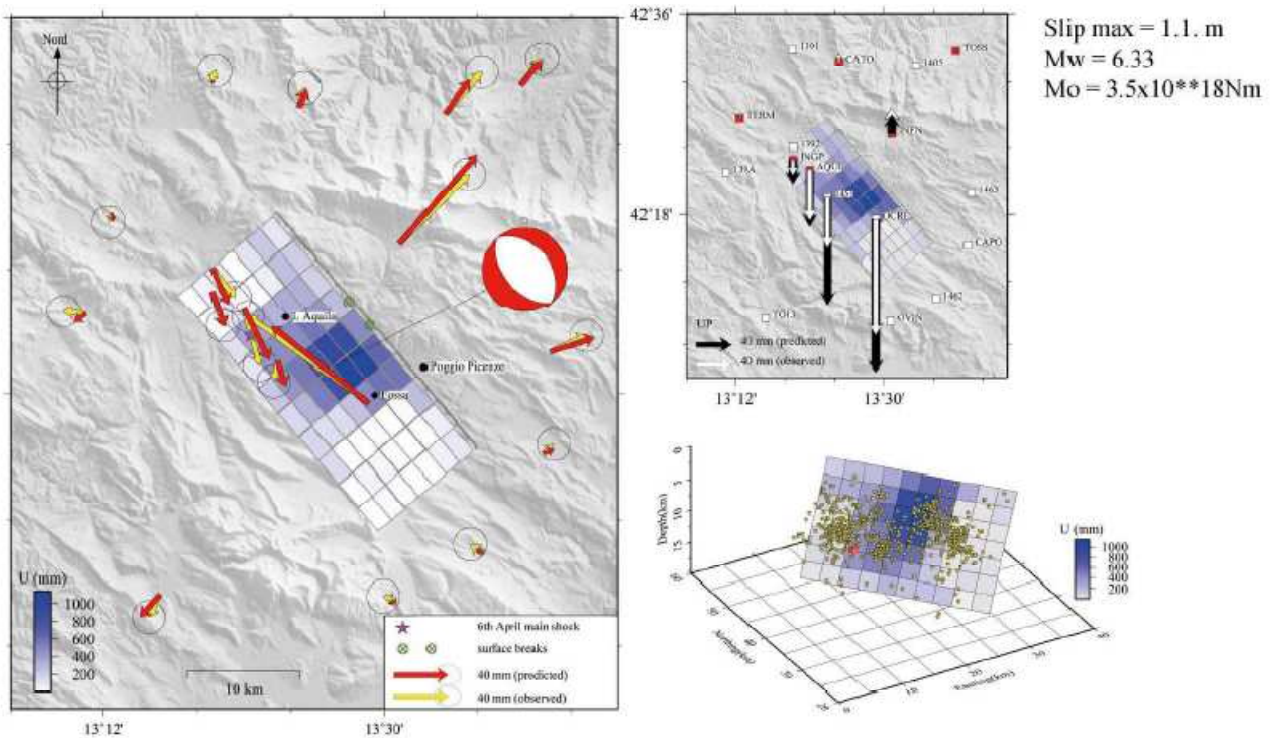


Figura 3.10. Dati GPS: a sinistra spostamenti orizzontali previsti (in rosso) ed osservati (in giallo), a destra movimenti verticali e la soluzione proposta del piano di faglia (modificata da D'Agostino 2009)

Le misurazioni post-evento da GPS effettuate il 6, 7 e 8 aprile 2009, confrontate coi dati ottenuti il 5 aprile e, per alcune stazioni, con misurazioni prese negli anni passati, dimostrano deformazioni della superficie terrestre “istantanee” associate a questo terremoto (nella figura 3.10, vettori in giallo). I movimenti orizzontali indicano un’area in estensione con la rotazione dei vettori spostamento nell’area di massima deformazione, dovuto all’effetto di rimbalzo nella direzione NW-SE dell’area soggetta alla trazione SW-NE. I movimenti verticali tendono ad aumentare spostandosi dalla città de L’Aquila verso sudest. Il piano di faglia si trova vicino a Paganica dove si sono presentate fratture co-sismiche del terreno (EMERGEO Working Group, 2009).

3.5.2 Dati InSAR

Le prime analisi interferometriche disponibili alla comunità scientifica sono state svolte da COSMO-SkyMed che ha usato immagini del 19 febbraio e del 9 aprile. La figura 3.11 mostra il primo interferogramma, l’epicentro della scossa di $M_w=6,3$ (quadrato grande) e gli eventi con $M_w>4,0$ (quadrati piccoli) e la localizzazione delle fratture del terreno (linea gialla). Questa immagine mostra che le deformazioni superficiali iniziali si sono concentrate a N dell’epicentro della scossa principale e lungo una linea che parte da L’Aquila e passa da Poggio Pienze.

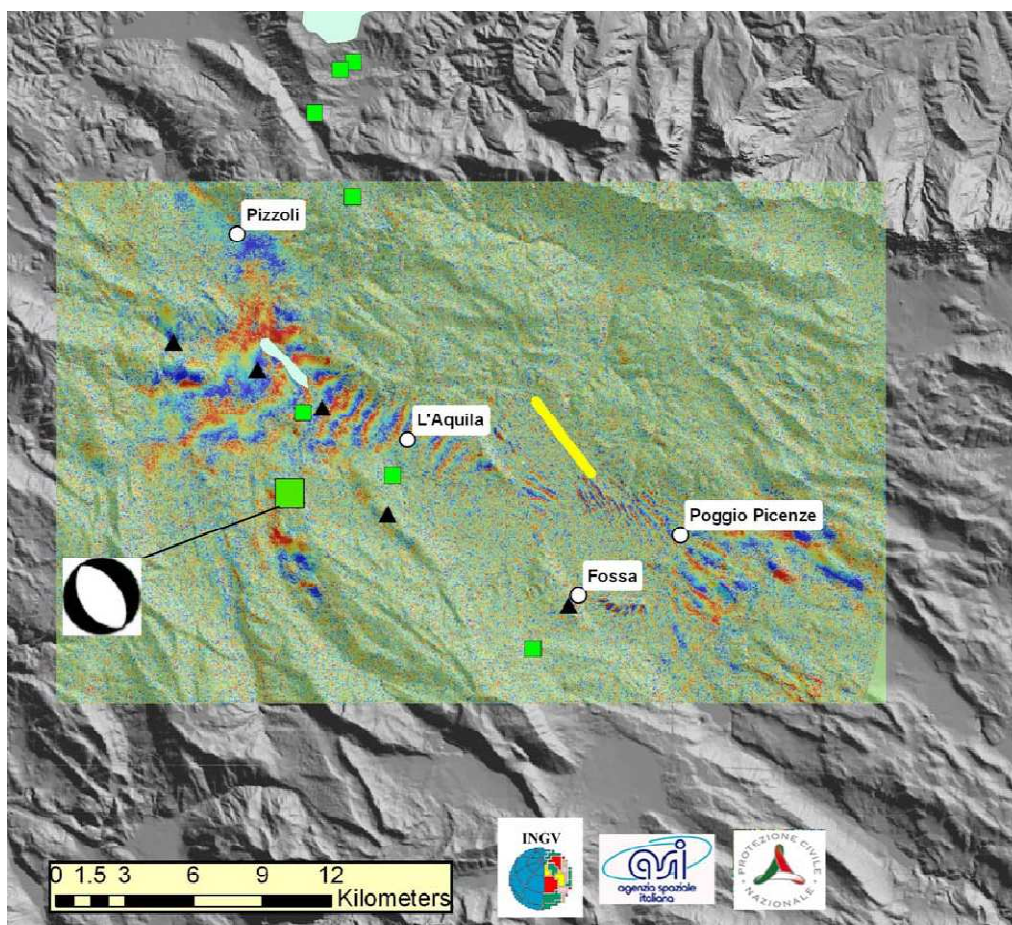


Figura 3.11. Interferogramma svolto partendo dalle immagini del Cosmo-SkyMed del 19 febbraio e 9 aprile (Emergeo Working Group, 2009)

Nella figura 3.12 è rappresentato il piano di faglia (in blu) risultante da un modello numerico elaborato dall'INGV e basato sui dati COSMO-SkyMed. Grazie a questo modello è stato possibile ricostruire con buona approssimazione la posizione del piano di faglia. La traccia nera in figura rappresenta l'emersione parziale del piano di faglia alla superficie. Il piano immerge di circa 50° verso sud-ovest e passa sotto alla città de L'Aquila. Il blocco di crosta terrestre a sud ovest del piano ha scorso verso il basso di circa 90 centimetri (nella direzione della massima pendenza), e ha causato in superficie l'abbassamento del suolo visibile in figura con il colore rosso. Secondo i dati interferometrici, il piano della dislocazione incontra la superficie presso l'abitato di Paganica, dove i geologi dell'INGV hanno riscontrato sul terreno l'esistenza di fratture con spostamenti di alcuni centimetri.

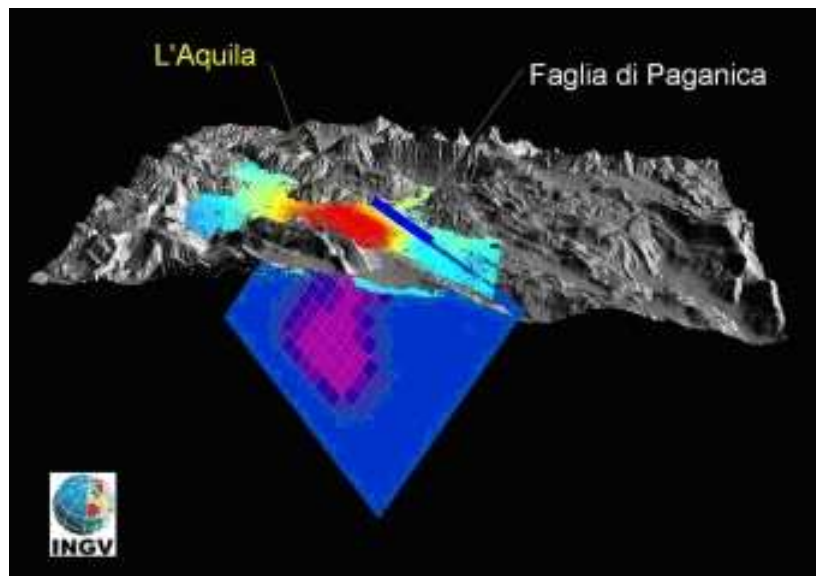


Figura 3.12. Rappresentazione del piano di faglia (Fonte: INGV)

La figura 3.13 presenta un'analisi che mostra le frange interferometriche che sono state create usando immagini prese da ENVISAT e COSMO-SkyMed. Alcune immagini dell'area colpita dal terremoto, che sono state acquisite da COSMO-SkyMED a partire dal 6 aprile, sono state analizzate con la tecnica interferometrica DInSAR (Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar). Questa tecnica si basa su acquisizioni di una stessa zona geografica ottenute con gli stessi angoli di vista, in tempi diversi, allo scopo di misurare, mediante l'utilizzo di algoritmi specifici, deformazioni della superficie terrestre.

Nella figura 3.13 ogni frangia concentrica (fascia di colore concentrica) corrisponde ad un abbassamento del suolo di 1,5 cm. Nella stessa immagine, Salvi et al. (2009) mostrano anche la traccia dell'allineamento delle fratture del terreno che sono state osservate vicino al centro di Paganica (EMERGEO Team, 2009).

Osservando la figura 3.13 è possibile supporre quanto segue: la scossa è stata causata dalla riattivazione di queste faglie superficiali, chiamate faglia di Bazzano-Fossa, Pettino e soprattutto Paganica (Valensise, 2009). Quest'ultima faglia ha un angolo di immersione di circa 70 gradi, in accordo con la profondità delle altre faglie attive dell'area. La faglia di Paganica si trova radicata in una faglia più profonda con un angolo

minore (angolo di immersione di circa 50 gradi). Sulla faglia di Paganica si è verificata una concentrazione accidentale di energia sismica, e la forte scossa ha provocato uno spostamento maggiore di quello verificatosi dagli altri due elementi tettonici che sono stati riattivati (faglia di Bazzano-Fossa e di Pettino). Il movimento di riattivazione (o di attivazione, nel caso della faglia di Paganica, responsabile della scossa principale) conferma che queste sono faglie attive.

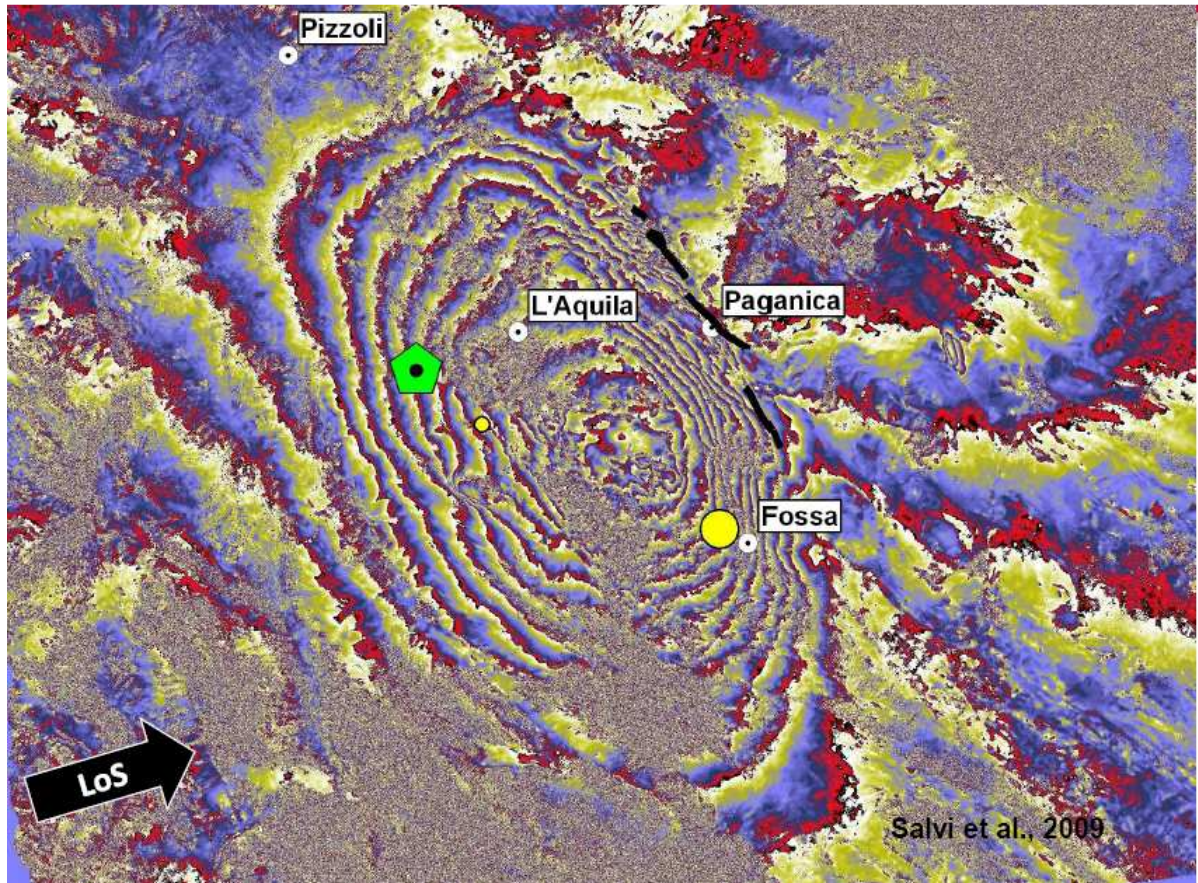


Figura 3.13. Frange interferometriche di spostamenti co-sismici (modificata da Salvi et al., 2009). La linea nera indica l'allineamento delle rotture del terreno associate alla faglia di Paganica. La discontinuità segnata con la linea rossa corrisponde alla faglia di Bazzano-Fossa

3.6 Conclusioni

Lungo il margine tirrenico della costa italiana si presenta un campo di sforzi distensivi che ha lasciato tracce evidenti ed è tuttora attivo, ciò è indicato dal fatto che i terremoti in questa zona sono prevalentemente associati a faglie normali (cioè che separano blocchi in allontanamento reciproco).

La geologia può essere schematicamente presentata affermando che nell'Appennino centrale abruzzese sono riconoscibili due grandi sistemi deposizionali meso-cenozoici; il primo è rappresentato dalle piattaforme carbonatiche mesozoiche (calcarei e dolomie), il secondo è costituito da potenti depositi silico-clastici (argille ed arenarie). L'emersione della catena ha determinato successivamente un'intensa fase erosiva Plio-Pleistocenica. I cicli sedimentari erosivo-deposizionali hanno prodotto depositi di versante ed estesi depositi lacustri ed alluvionali che hanno colmato i bacini intrappenninici.

Il contesto sismotettonico dell'area interessata dal terremoto aquilano del 6 aprile 2009 si può inquadrare nei processi estensionali che caratterizzano la deformazione della crosta appenninica ed in particolare in quelli relativi alla distensione NE-SW di questo settore di catena. Tale estensione (valutata nell'ordine dei 3 mm/anno tramite misurazioni GPS; Mantenuto et al., 2007) è accomodata da faglie normali ad andamento NW-SE ed immersione tirrenica, alle quali va ascritta tutta la maggiore sismicità dell'Appennino centrale (Galadini e Galli, 2000).

Attualmente la comunità scientifica tende a considerare i terremoti del 1461 e del 2009 come il risultato dell'attivazione di una sorgente la cui espressione in superficie è rappresentata dalla faglia qui ridefinita Collebrincioni-San Demetrio (PFS, Paganica Fault System) (figura 2.5).

La lunghezza della fagliazione di superficie qui presentata è in buon accordo con i modelli di faglia ottenuti dall'inversione dei dati SAR e GPS (Atzori et al., 2009), che prevedono una lunghezza di circa 20 km, con l'estensione della distribuzione delle repliche (INGV, 2009), oltre che con i valori ottenibili usando leggi empiriche di regressione lunghezza faglia-magnitudo (per esempio $M_w=6.3$, $L=20$ km per le faglie italiane; in Galli et al., 2008). Tenuto conto della distanza tra l'ipocentro fornito da INGV (2009) e la faglia in superficie e della distribuzione delle repliche, la pendenza media della faglia in profondità è di circa 60° , circa la stessa di quella misurata sui piani di faglia in roccia rimobilizzati ($65^\circ \pm 5^\circ$). Il tasso di scorrimento di questa faglia è stato valutato in modo preliminare tra 0,3 e 0,7 mm/anno, tipico per le faglie appenniniche.

4 Intensità macrosismica

4.1 Introduzione

In questo capitolo viene trattato il tema dell'intensità macrosismica. Dopo aver presentato le diverse tipologie edilizie e le condizioni di manutenzione delle costruzioni presenti nell'area dell'aquilano, si analizza la distribuzione dei differenti gradi di intensità macrosismica secondo la scala MCS (Mercalli, Cancani, Sieberg) nel territorio colpito dal sisma del 6 aprile 2009 ed infine viene trattato il tema del risentimento, ossia di quanto le persone hanno percepito la scossa, così da poter stimare un grado di intensità macrosismica a partire dai questionari raccolti (nei primi 10 mesi dopo il terremoto ne sono stati compilati circa 11.500). Le fonti principali di documentazione sono state: Di Capua et al., 2009 e Galli e Camassi, 2009.

4.2 Tipologie edilizie e condizioni di manutenzione

Occorre sottolineare che nell'area aquilana, e nello stesso capoluogo, sono presenti tipologie edilizie e condizioni di manutenzione molto diverse. Insieme a nuclei di edilizia storica in pietra, solitamente non squadrata, di pezzatura molto irregolare e con sporadiche presenze di muratura a sacco (rilevanti in alcuni casi in cui gli effetti di danno sono risultati gravissimi, in particolare per l'edilizia monumentale), convivono nuclei di edifici in cemento armato, recenti o meno recenti.

Nella maggior parte degli insediamenti circostanti aventi una popolazione con un reddito inferiore rispetto a quello della città principale, è stata usata una tecnica di costruzione detta a sacco che rende gli edifici molto vulnerabili ai danni dei terremoti.

La definizione di pietra grezza (a sacco di ciottoli, pietrame, mista) è la seguente: "costruzioni minori nelle quali vengono utilizzate pietre non lavorate e malta di qualità scadente, che danno origine a costruzioni pesanti e di scarsa resistenza alle azioni orizzontali; gli orizzontamenti sono tipicamente in legno e non consentono ripartizioni delle azioni tra le pareti; in presenza di volte in muratura, le catene sono assenti o in numero limitato" (da Giovinazzi e Lagomarsino, 2001).

All'interno dei centri storici di numerose località dell'aquilano, fra gli edifici in pietra sono presenti nuclei, a volte anche consistenti, di edifici in completo abbandono da decenni e parzialmente diroccati prima del terremoto. Allo stesso tempo convivono nel medesimo insediamento, a distanze molto ridotte, edifici in muratura utilizzati abitualmente e in normali condizioni di manutenzione, edifici in pietra, mattoni o blocchetti di cemento, con solai e coperture in laterocemento, insieme a ville o condomini molto recenti in cemento armato (Galli e Camassi, 2009).

In qualche caso si osservano edifici in muratura in cui sono visibili interventi relativamente recenti, con la sovrapposizione di una cordolatura e una copertura in CA. Come osservato anche in occasione del

terremoto del 1997 in Umbria Marche, questi interventi, senza un contestuale rinforzo delle strutture verticali, hanno solitamente determinato effetti negativi sulle murature.

La distribuzione spaziale di queste tipologie edilizie, nei diversi centri, è risultata molto variabile: in qualche caso gli edifici più recenti rappresentano la semplice espansione del vecchio centro abitato, in qualche altro caso ne sono una diramazione, in perfetta continuità, in una certa direzione, oppure sono dislocati in un'area adiacente, ma significativamente diversa. Queste situazioni così variabili hanno generalmente reso molto complessa la stima dell'intensità macrosismica.

Sono state esaminate le costruzioni a L'Aquila e in altri 20 paesi circa: mentre a L'Aquila edifici tardo medievali, di epoca romanica e rinascimentali e opere d'arte hanno subito gravi danni, nei paesi piccoli come Onna, Paganica e Castelnuovo si sono verificati danni di estensione più diffusa; più del 50% dei centri storici sono stati danneggiati gravemente. In altri paesi come Barisciano, Santo Stefano e Monticchio circa il 20-25% delle costruzioni in centro hanno subito danni elevati. La differenza tra i livelli di danno in località vicine, come Onna e Monticchio, che hanno costruzioni in muratura non rinforzata della stessa qualità e caratteristiche, è spiegabile tramite gli effetti di amplificazione di sito.

Dopo il terremoto del 1703, sono stati introdotti degli accorgimenti alle costruzioni in muratura inserendo nel muro un'asse di circa 20 cm di diametro agganciato con del legno o del ferro al muro perpendicolare (figura 4.1). A Paganica sono stati osservati diversi esempi di questo tipo in cui il primo piano è stato costruito dopo il terremoto del 1703 usando questa tecnica, ma il secondo e terzo piano sono stati aggiunti nel XIX secolo senza le giunzioni di legno o ferro, poiché la tecnica era stata dimenticata (Rovida et al., 2009).



Figura 4.1. Dettaglio di un edificio del diciottesimo secolo (tratta dal report di EERI, giugno 2009)

Le costruzioni residenziali del periodo successivo alla seconda guerra mondiale sono state costruite prevalentemente in cemento armato, solitamente di 2-4 piani, ed in alcuni casi fino ad 8 piani. Molti sono condomini multifamiliari e alcuni hanno uffici o negozi al piano terra. L'Aquila è stata considerata zona sismica dopo il terremoto di Avezzano del 1915, e da allora le costruzioni sono state progettate con metodi antisismici.

In generale le costruzioni in cemento armato della regione de L'Aquila hanno retto abbastanza bene, considerando le precauzioni sismiche di progetto limitate e la severa scossa del terreno, spesso superiore al livello di progetto. Si sono verificati diversi livelli di danni facilmente riparabili ai muri esterni (un esempio figura 4.2). La maggior parte delle costruzioni in cemento armato nella città de L'Aquila non sono state danneggiate in modo sostanziale ma hanno solo presentato danni non strutturali.



Figura 4.2. Struttura in cemento armato vicino alla stazione ferroviaria de L'Aquila con danni ai muri esterni ma struttura intatta (foto di inizio settembre 2009)

4.3 Intensità macrosismica

Le scale di intensità macrosismica classificano in modo empirico la severità di un sisma secondo una scala ordinale in gradi degli effetti prodotti, in una zona limitata, dallo scuotimento del suolo sulle strutture civili (danni alle costruzioni) e, in misura minore, dei cosiddetti danni deformativi indotti (danno di natura geologica o geomorfologica). Nel corso della storia sono state create diverse scale tra cui la Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS) (l'appendice A definisce i gradi di intensità MCS) la cui versione definitiva è del 1930

(Sieberg, 1930); tale scala è tuttora usata in alcuni paesi europei, ed in particolare in Italia, per ragioni di continuità storica, ma inadatta per il patrimonio edilizio moderno.

Da qualche anno è stata consolidata la versione definitiva della scala EMS-98 (European Macroseismic Scale 1998), che contempla una casistica dettagliata di tipologie costruttive e di livelli di danno, miranti a rendere il più oggettiva possibile la valutazione dell'intensità (Faccioli e Paolucci, 2005).

In Italia in occasione di terremoti al di sopra della soglia del danno, un gruppo di "pronto intervento macrosismico", appartenente all'INGV (gruppo QUEST: QUick Earthquake Survey Team), composto da operatori afferenti a diverse istituzioni si attiva al fine di realizzare il rilievo speditivo del danneggiamento in termini di scala MCS.

Nella notte del 6 aprile, l'attivazione degli operatori QUEST è avvenuta in maniera "forzata", non fosse altro perché quelli residenti a Roma sono stati svegliati insieme al resto della popolazione della Capitale dalle scosse del terremoto. Questo ha fatto sì che la prima squadra ha iniziato il rilievo alle prime luci dell'alba, seguita da una seconda nel pomeriggio e da altre nei giorni successivi, fino ad oltre 5 squadre che hanno agito a rotazione per diversi giorni. Molte località colpite sono state visitate da squadre diverse e molte sono state riviste in tempi successivi al fine di rendere omogenea la valutazione del grado e di verificare eventuali aggravamenti del danneggiamento (Galli et al., 2009).

La considerazione dell'estrema variabilità delle tipologie edilizie presenti nei diversi insediamenti, la presenza di edifici in situazione di forte degrado preesistente e la frequente spiccata differenza di danneggiamento fra i centri storici e le parti di sviluppo recente, ha reso particolarmente difficile la valutazione degli effetti in termini di intensità macrosismica. Queste differenze sono talmente marcate in qualche caso, da non poter essere sufficientemente mediate dalla consueta espressione delle incertezze fra un grado e l'altro della scala.

Per alcune località l'intensità macrosismica assegnata al solo nucleo storico era maggiore anche di 2 gradi MCS di quella assegnata alla località per intero. Infatti, laddove l'abitato è rimasto contenuto nel centro storico, il grado MCS non differisce da quello assegnato all'intero abitato (per esempio Sant'Eusanio Forconese, Onna, Villa Sant'Angelo, Casentino), mentre per altri la differenza oscilla tra 1/2 e 2 gradi.

Questo problema è stato affrontato con particolare attenzione per l'area urbana de L'Aquila, che è stata esplorata con molta attenzione anche per consentirne una valutazione in termini di EMS (Tertulliani et al. hanno valutato l'intensità macrosismica EMS per le diverse zone del centro storico de L'Aquila; 2010). La stima di intensità è sostanzialmente riferita all'area del centro storico, mentre il danneggiamento delle aree periferiche è sostanzialmente inferiore, di oltre un grado della scala MCS, rispetto all'area del centro storico (Galli e Camassi, 2009).

Come sempre accade per i terremoti legati all'attivazione di strutture di faglia di diversi chilometri (per esempio in Appennino centrale: terremoto del Fucino del 1915, terremoto di Colfiorito, 1997), la

distribuzione degli effetti in occasione dell'evento dell'aprile 2009 è stata guidata dalla geometria e orientazione della faglia attivata e dal verso di propagazione della rottura. La figura 4.4 mostra bene questa situazione, con l'area mesosismica ($I \geq VII-VIII$) concentrata nel tetto del sistema di faglie di Paganica-San Demetrio (PSDFS) e con un'importante "coda" di elevate intensità (VII) in direzione SE, lungo la media Valle dell'Aterno, sin verso la conca subéquana.

In figura 4.3 sono indicate le localizzazioni delle città e dei paesi nominati in seguito. In area mesosismica l'intensità massima è stata assegnata a Castelnuovo e ad Onna ($I=IX-X$ MCS), dove circa la metà degli edifici sono crollati e comunque gran parte sono andati distrutti, con la morte di oltre un decimo della popolazione residente quella notte (circa 350 persone). Estese distruzioni e crolli (IX MCS) hanno subito anche altre frazioni ubicate in prossimità dell'emergenza in superficie della faglia, come Tempera (8 vittime), San Gregorio (8 vittime) e Villa Sant'Angelo (17 vittime), mentre distruzioni e crolli più localizzati ($VIII$ MCS) hanno interessato altre località prossime alla faglia, quali Paganica (5 vittime), Bazzano (1 vittima), Casentino e Tussillo. La rottura passa sotto Onna ad una profondità di circa 3 km e sotto L'Aquila a circa 6 km (Galli et al., 2009).

Nella zona più prossima all'epicentro strumentale, a parte le gravi distruzioni ed i numerosi crolli parziali del centro storico de L'Aquila ($VIII-IX$ MCS, circa 200 vittime), vi è da segnalare nel bacino di Roio la distruzione pressoché totale del centro storico di Poggio di Roio (di fatto un $VIII-IX$ MCS) ed i gravissimi danni ad altre due località limitrofe (Colle di Roio e Roio Piano, $VIII$ MCS).

In questo grave quadro di danneggiamento emergono alcune anomalie consistenti in intensità con valori bassi che, a parità di tipologia costruttiva e vulnerabilità degli edifici, appaiono spiegabili appieno solo con effetti di deamplificazione del moto del suolo; queste riguardano il paese di Monticchio, nel quale, a meno di isolate eccezioni nella periferia dell'abitato, sono state osservate solo lesioni lievi in poche decine di edifici (VI MCS) e la frazione di Cerro (Fossa), ove non vi sono stati praticamente danni (V MCS). E' da sottolineare come queste località siano prossime (1-2 km) ad Onna, il primo, ed a Fossa ($VII-VIII$, 4 vittime) il secondo.

Altre anomalie, questa volta che presentano intensità particolarmente elevate, sono rappresentate dal nucleo storico di Poggio Picenze ($VIII-IX$ MCS, 5 vittime) ed il già citato Castelnuovo ($IX-X$ MCS, 5 vittime), entrambi ubicati nel tetto della faglia e circondati da località con intensità comprese tra il $V-VI$ ed il $VI-VII$. In particolare Castelnuovo appare come il più evidente effetto di amplificazione locale dell'intero terremoto, ubicato come è in cima ad una collinetta di limi bianchi del Pleistocene inferiore, sovrastati da un corpo residuo di conglomerati (figura 5.25). Anche in questo caso, di fatto, l'acropoli fortificata è stata rasa praticamente al suolo ($X-XI$ MCS) come già accaduto nel 1461 (Galli et al., 2009).

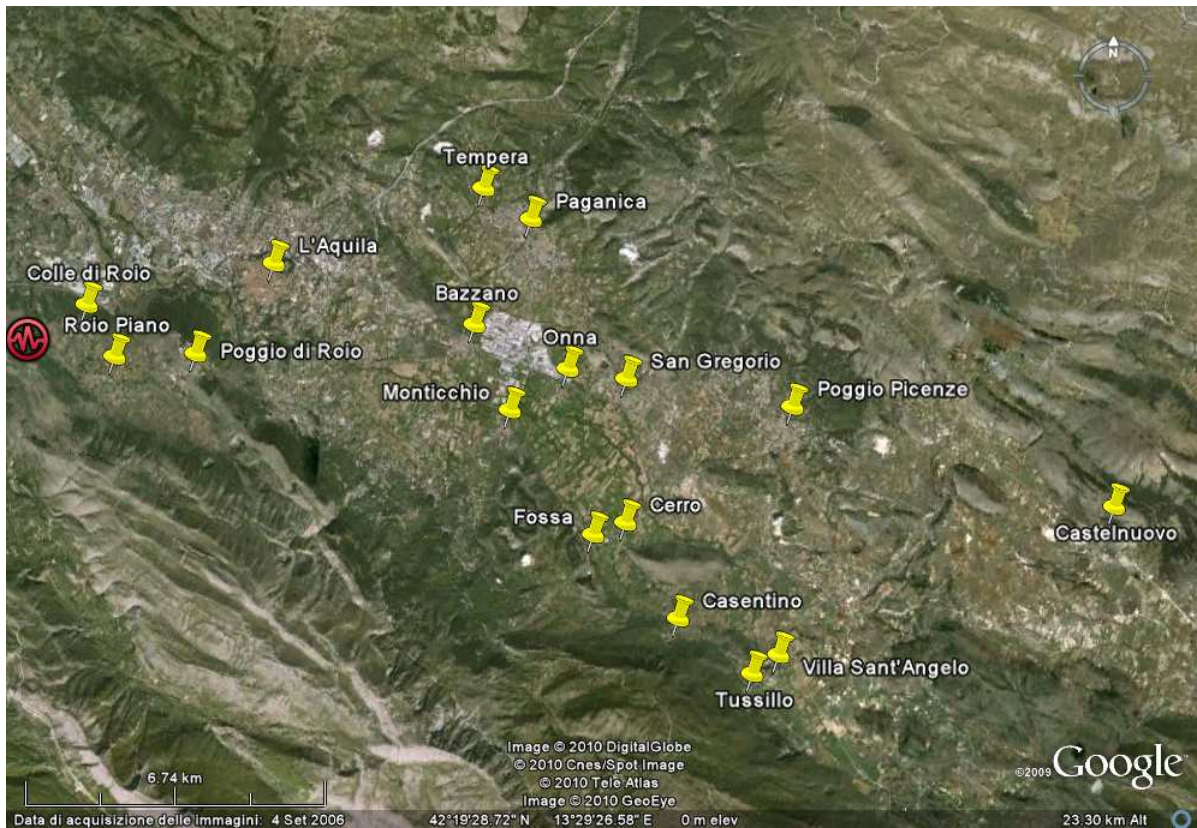


Figura 4.3. Localizzazione di alcuni paesi danneggiati in seguito al terremoto del 6 aprile

Sebbene anche l'area di VI grado appaia allungata in direzione NW-SE per oltre 70 km, essa presenta diverse riprese ed "isole" nei quadranti nordorientali (aree del teramano e pescarese), dove numerose località hanno subito un lieve danneggiamento diffuso (aree a nord della catena del Gran Sasso e ad est di quella dei monti Morrone-Cappucciata-San Vito). Nonostante queste ultime siano tutte distribuite nel letto della faglia, esse sono potenzialmente affette da fenomeni sia di amplificazione locale (dovuti alla presenza di terreni con scadenti proprietà meccaniche) che di dissesto (di fatto, in molte di queste località le zone maggiormente danneggiate insistono su pendii in frana) (Galli et al., 2009).

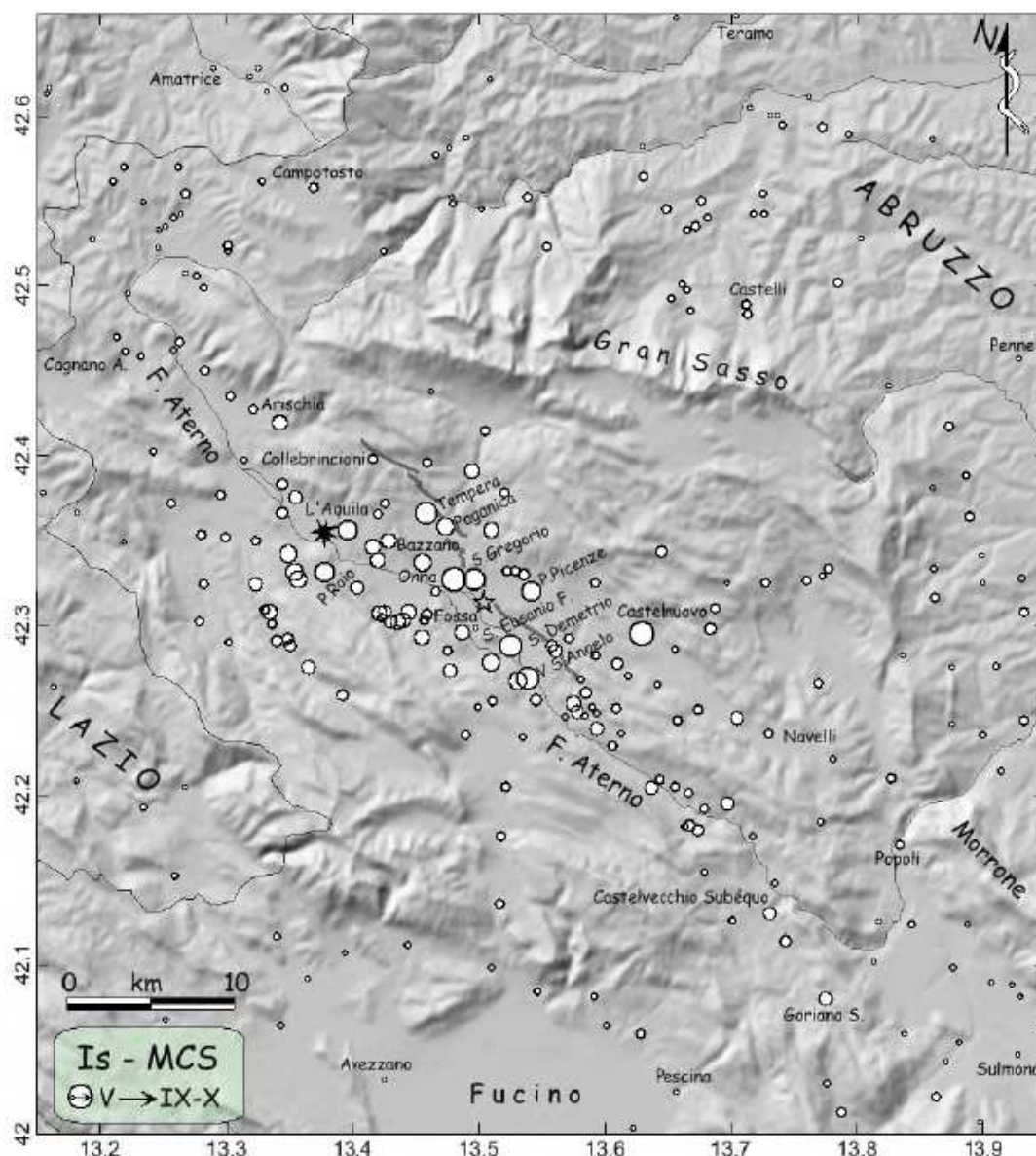


Figura 4.4. Distribuzione delle intensità macrosismiche rilevate dal QUEST in occasione del terremoto del 6 aprile 2009. La stella vuota è l'epicentro macrosismico calcolato mediante l'algoritmo Boxer (Gasperini, 2004). Quella piena è l'ipocentro strumentale (INGV, 2009). Le linee in grigio rappresentano il sistema di faglie di Paganica-San Demetrio, responsabile del terremoto (faglia normale immergente a SW, caratterizzata per tutta la sua lunghezza da fratture superficiali e/o rigetti massimi di 10-15 cm). Notare come l'area mesosismica sia quasi interamente sviluppata nel tetto della faglia ed anche il marcato effetto di direttività della rottura, evidenziata dall'estensione verso SE delle intensità più elevate, dall'ipocentro nella conca aquilana sino a quella subéquana (Castelvecchio Subéquu-Goriano Sicoli)

Dall'analisi della figura 4.5 si nota l'assenza di isosime vere e proprie, ciò può essere dovuto alla presenza delle asperità nel piano di faglia, alle caratteristiche geologiche del sito o a quelle topografiche. In linea di massima è possibile tracciare delle isosime indicative, in particolare l'ellisse che separa la zona che ha presentato danni (I_M MCS > VI) da quella senza danni (nella figura 4.5 è stata tracciato un poligono che separa approssimativamente la zona che ha presentato danni da quella non danneggiata). I punti più anomali si trovano in corrispondenza del paese di Castelnuovo e di Arischia che sono situati lungo una retta

avente un angolo rispetto al nord simile all'azimut di faglia (azimut 133°); per il caso specifico di Castelnuovo l'aspetto di amplificazione topografica ha contribuito al danneggiamento degli edifici (si veda la trattazione specifica del paese nel paragrafo 5.3). Si noti che il poligono tracciato ha un'inclinazione, rispetto al nord geografico, corrispondente all'azimut della faglia. Osservando la figura 4.5 risulta chiara l'inclinazione di rottura della faglia, dall'area più occidentale in profondità (ipocentro) verso quella più orientale in superficie.

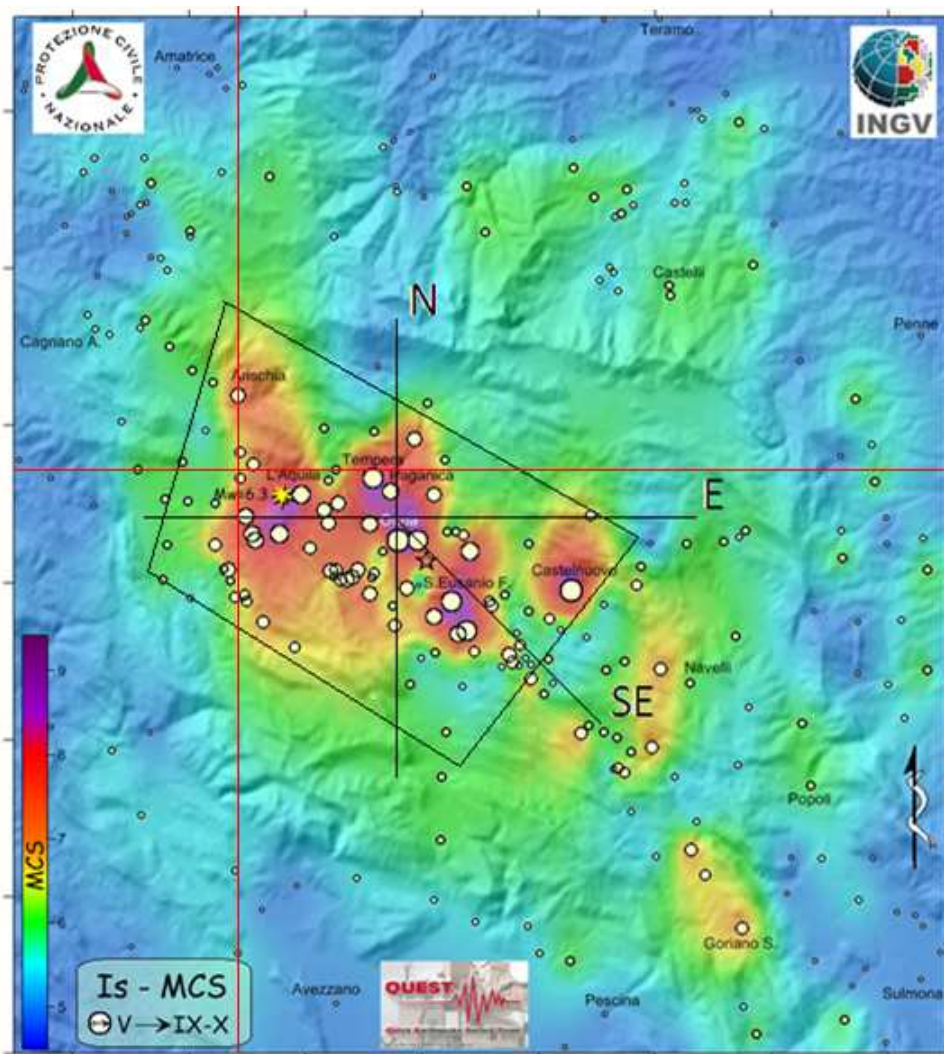


Figura 4.5. Distribuzione delle intensità macrosismiche del terremoto del 6 aprile 2009 (cerchi proporzionali all'intensità locale). L'immagine a colori sottostante è un'interpolazione dei dati puntuali di intensità e suggerisce l'estensione generale del danneggiamento (scala cromatica a sinistra). La stella indica l'epicentro macrosismico (in giallo l'ipocentro strumentale). In nero è tracciato un poligono che approssimativamente separa la zona danneggiata da quella che non ha presentato danni; il punto di incontro delle linee in rosso indica la localizzazione delle stazioni della valle dell'Aterno (AQA, AQG, AQM, AQV). Fonte: INGV

Se si considerano i soli paesi a cui è stato attribuito un grado di intensità macrosismica 9 o 9,5, si nota che si trovano tutti lungo la linea di faglia in superficie, ad esclusione di Castelnuovo che ha subito una completa distruzione a causa soprattutto della sua particolare condizione topografica (figura 4.6). Si osservi che non vi sono stazioni di registrazione in corrispondenza dei paesi più danneggiati.

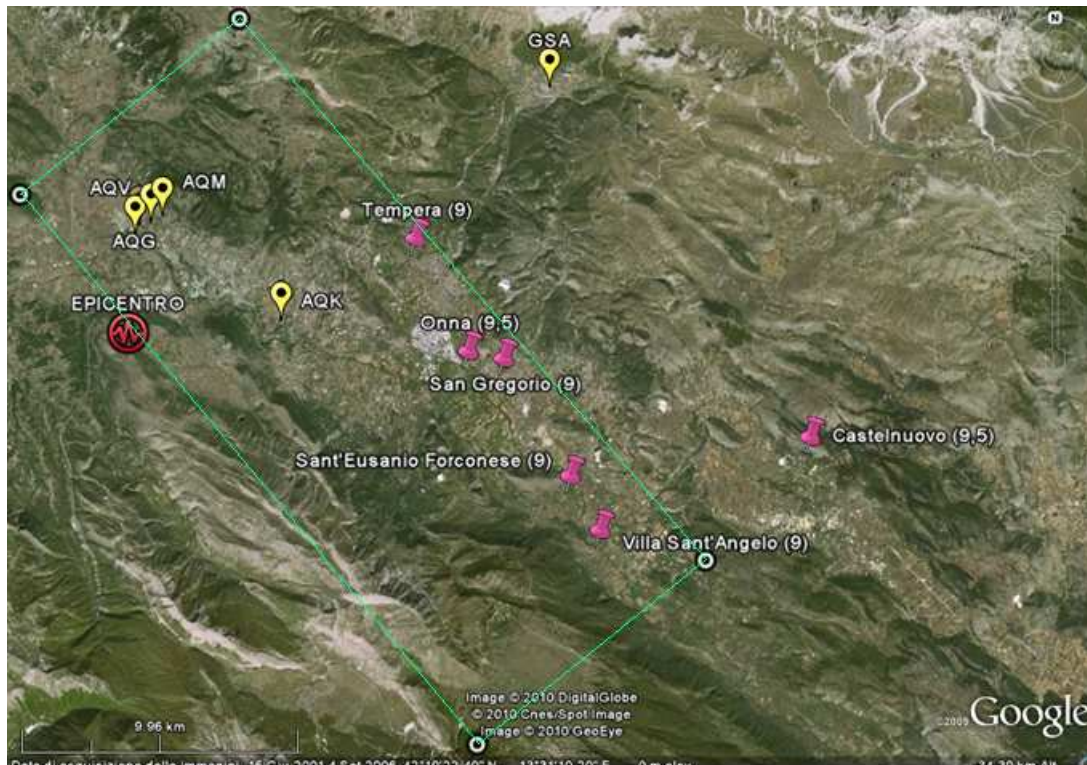


Figura 4.6. Mappa con indicati i paesi che hanno presentato un grado di intensità macrosismica 9 o 9,5 (segnati in rosa), l'epicentro (in rosso), le stazioni di registrazione (in giallo) e la traccia dell'area della proiezione della faglia in superficie (in verde). Si noti che, ad esclusione di Castelnuovo, tutti gli altri paesi si trovano a breve distanza dalla linea della faglia in superficie

4.4 Risentimento

Sul sito internet dell'INGV è possibile compilare un questionario utilizzato per stabilire il grado di intensità macrosismica in base alla percezione delle persone che hanno sentito la scossa di un terremoto italiano. In 10 mesi il questionario riguardante il terremoto del 6 aprile 2009 è stato compilato da circa 11.500 persone; la figura 4.7 illustra la mappa del risentimento macrosismico MCS relativa al terremoto aquilano, riguardante tutto il territorio nazionale. L'osservazione di un singolo individuo viene probabilisticamente associata ad un valore della scala MCS. Queste mappe non hanno carattere definitivo e vengono aggiornate quando sono disponibili nuovi dati.

Osservando la mappa relativa al risentimento, disponibile nel sito www.haisentitoilterremoto.it, si nota che in linea di massima il risentimento maggiore si è avuto nella zona della proiezione della faglia in superficie ossia a sud-est dell'epicentro quindi i dati dei questionari sono in accordo con i valori raccolti dalle squadre di lavoro; inoltre nella zona prossima alla faglia si osserva che il risentimento maggiore si ha vicino a Castelnuovo e che nell'intera città de L'Aquila è stato segnalato un risentimento di grado 6 quindi di 2,5 gradi inferiore a quello stabilito dal gruppo di lavoro per il centro storico della città, infatti l'intensità macrosismica di 8-9 attribuita a L'Aquila si riferisce al solo centro storico, e tale valutazione non può essere estesa all'intera area metropolitana de L'Aquila per la quale bisogna stimare un altro grado di intensità (Tertulliani et al, Maggio 2010).

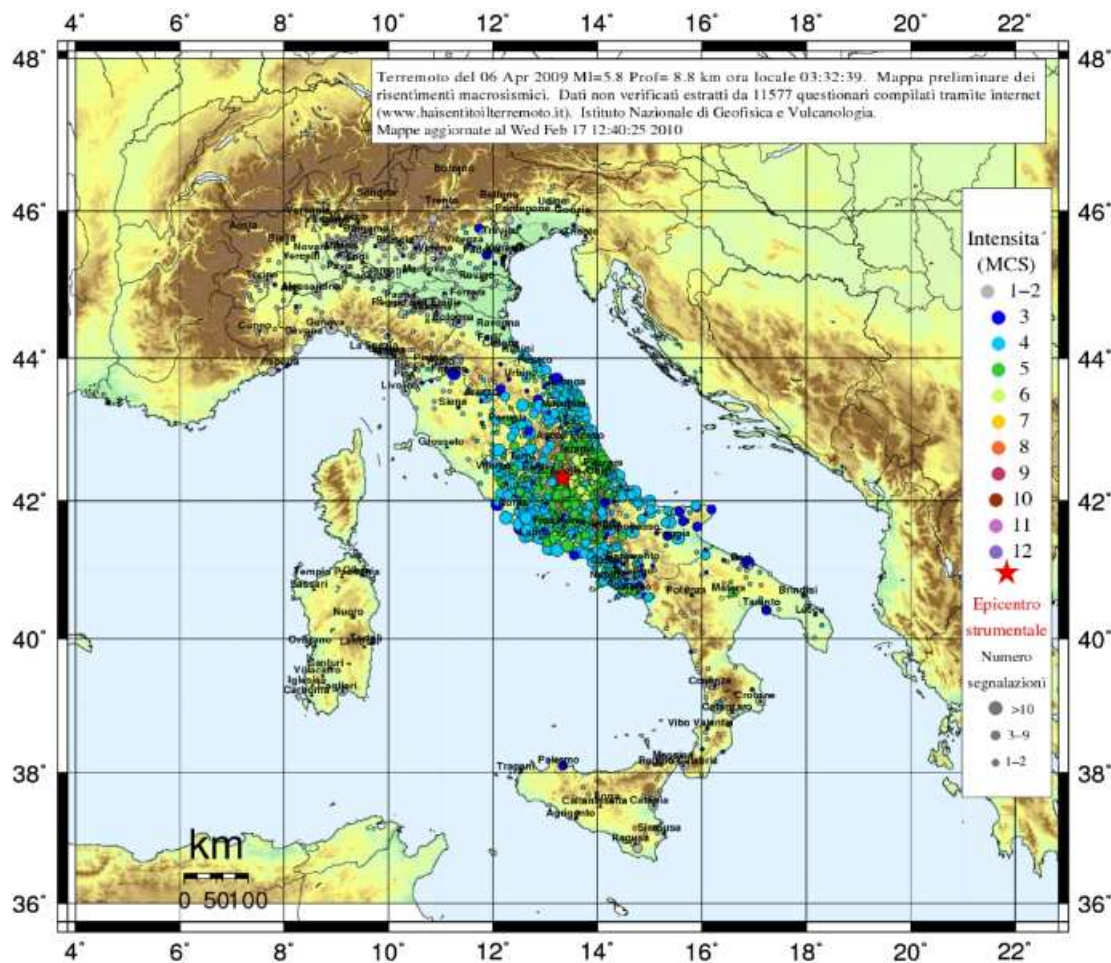


Figura 4.7 Mappa del risentimento macrosismico MCS aggiornata al 17 febbraio 2009 (sito www.haisentitoilterremoto.it)

4.5 Conclusioni

Per il gruppo QUEST dell'INGV non è sempre stato semplice attribuire il grado di intensità macrosismica alle diverse località, in quanto in molti casi vi è una marcata differenza nelle tipologie del costruito tra il centro storico e la parte più esterna; per esempio a L'Aquila è stata attribuita intensità tra 8 e 9 valutando il solo centro.

Le abitazioni in muratura sono una tipologia di costruito tipica della zona dell'aquilano, la scarsa qualità di queste costruzioni gli attribuisce un'alta vulnerabilità, superiore a quella delle costruzioni in adobe. Si ritiene che la breve durata della scossa principale del 6 aprile abbia contribuito a salvare molte costruzioni dal collasso.

Le località più danneggiate si trovano sulla proiezione della faglia in superficie, ad esclusione di Castelnuovo che ha presentato intensità macrosismica 9 soprattutto a causa della sua particolare topografia; in area mesosismica l'intensità massima è stata assegnata a Castelnuovo e ad Onna (Is = 9-10 MCS), dove circa la metà degli edifici sono crollati.

Nelle zone maggiormente danneggiate non vi erano strumenti di registrazione, ad esclusione della stazione AQK posta a L'Aquila, però non ubicata nel centro storico. Le altre quattro stazioni appartenenti alla microrete dell'Aterno sono localizzate a Coppito (Imcs=6,5, stazioni AQA e AQG) e a Cansatessa (Imcs 6,5, stazioni AQM e AQV). Con intensità 4,5 la località di Castel di Sangro (CDS) e Bojano (BOJ), con intensità 5: Antrodoco (ANT), Avezzano (AVZ), Chieti (CHT), Carsoli (CSO1), Montereale (MTR), Ortucchio (ORC) e Badia-Bagnaturo (SUL), intensità 5,5: Celano (CLN) e Fiamignano (FMG), ad Assergi, in cui si trova la stazione GSA, è stata attribuita intensità 6 (fonte: INGV).

Non è possibile tracciare le isosisme in quanto vi sono diverse anomalie nei gradi di intensità attribuiti, poiché hanno influenzato molto la topografia, le condizioni geologiche e la presenza delle asperità sul piano di faglia; in linea di massima si può identificare l'area che ha presentato un grado di danno maggiore di 6.

5 Danni osservati

5.1 Introduzione

Per la stesura del presente capitolo ci si è basati sulle osservazioni svolte in sito durante la prima settimana di settembre 2009. L'obiettivo della visita era osservare in prima persona il livello del danno a paesi ai quali le squadre addette (gruppo QUEST dell'INGV) avevano attribuito un diverso grado di intensità macrosismica; così si è deciso di visitare Castelnuovo (MCS 9-10), San Gregorio (MCS 9), Paganica (MCS 8), Coppito (MCS 6-7) e Monticchio (MCS 6). Inoltre si è voluta prestare attenzione a L'Aquila in quanto capoluogo di provincia.

Le foto sono state tutte scattate di persona nelle zone dove era possibile l'accesso. A L'Aquila era permesso raggiungere la piazza del Duomo da Corso Federico II, gran parte della città non era aperta, mentre i paesi circostanti erano percorribili quasi interamente, ad esclusione di Onna dove era completamente proibito l'accesso.

L'obiettivo del capitolo è di documentare diverse intensità di danno ad edifici ubicati nella città de L'Aquila e in alcuni paesi circostanti, è per questo motivo che si è scelto di visitare paesi con differenti caratteristiche geologiche e topografiche. In figura 5.1 è indicata l'ubicazione dei paesi scelti nell'analisi con i rispettivi valori dell'intensità macrosismica MCS assegnati dalle squadre di lavoro che sono intervenute immediatamente dopo la scossa principale del 6 aprile.

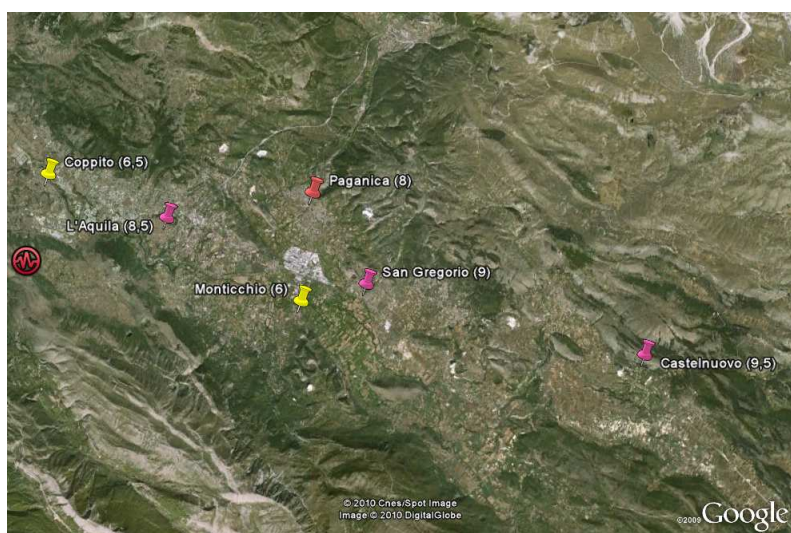


Figura 5.1 Ubicazione geografica dei paesi analizzati. Tra parentesi il valore dell'intensità macrosismica MCS (stabiliti dal gruppo QUEST, INGV). I colori dei segni indicano i diversi livelli di I_{MCS}

Per la classificazione del danno si è utilizzata la scala EMS98 illustrata nell'appendice B in figura B.1 per le costruzioni in muratura e in figura B.2 per quelle in cemento armato, in queste figure sono presenti anche schizzi illustrativi dei diversi gradi di danno.

In questo capitolo si mostrano inoltre alcune foto rappresentative dei vari livelli di danno dei paesi visitati.

5.2 L'Aquila (L'Aquila centro MCS 8 - 9)

5.2.1 Presentazione della città

L'Aquila è la capitale amministrativa della regione Abruzzo ed è circondata dalle montagne più alte degli Appennini (il Gran Sasso a nord-est), è situata sul ciglio di una pianura alluvionale ed è costeggiata dal fiume Aterno ad ovest, all'altezza di 655 metri.

La parte più antica del centro de L'Aquila è la città fortificata situata su una collina e con numerose case, ed edifici commerciali ed amministrativi in un'area di meno di 2 km². In cima alla collina la rete stradale è una griglia, ma lungo il pendio le griglie regolari si perdono. I due assi principali della città sono Corso Federico II/Corso Emanuele, e Via Roma/Corso Umberto. Queste vie principali sono larghe poco più di 7 m mentre le altre strade della città sono larghe 2,5 m (figura 5.2).

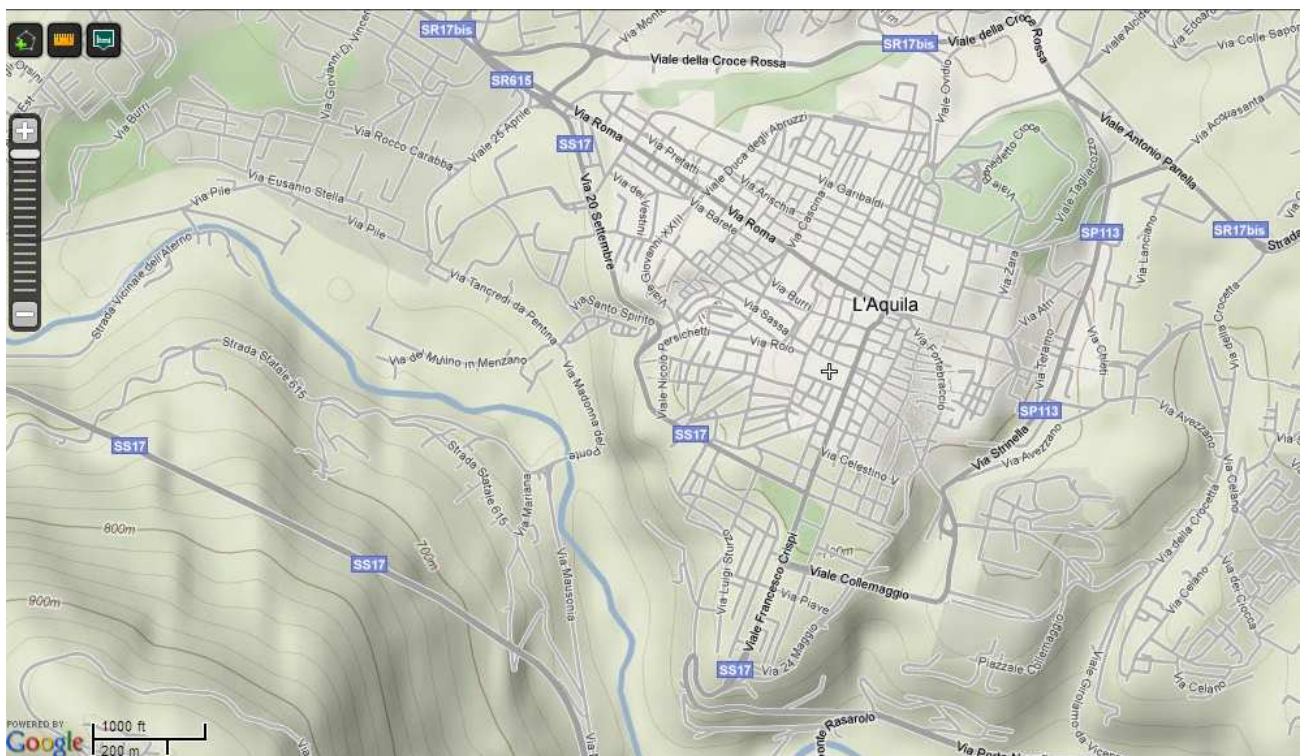


Figura 5.2 Mappa della città de L'Aquila con le curve di livello

L'Aquila ha subito un terremoto distruttivo nel 1703, di conseguenza la maggior parte degli edifici residenziali nella città fortificata sono posteriori a questo anno. La parte centrale della città ha una struttura medioevale con molti monumenti storici, inclusa l'importante chiesa di Santa Maria del Suffragio chiamata delle Anime Sante dai cittadini, nella centrale piazza del Duomo. La chiesa fu costruita nel 1713 dalla confraternita di Santa Maria del Suffragio, che scelse Piazza Duomo per la costruzione dopo che il terremoto del 1703 aveva causato forti danni alla chiesa che si trovava sul retro della Cattedrale (San Massimo). La costruzione, progettata dall'architetto Carlo Buratti, richiese molti anni e venne completata

nel 1775. Il centro della chiesa presenta due cappelle su entrambi i lati e una cupola neoclassica progettata per ingrandire l'area riservata al presbiterio. La cupola è collassata durante il terremoto del 6 aprile (figura 5.3).



Figura 5.3. Chiesa di Santa Maria del Suffragio con la cupola in fase di ristrutturazione dopo i danni subiti in seguito al terremoto del 6 aprile (foto di inizio settembre 2009)

La maggior parte degli edifici de L'Aquila sono di muratura in pietra, tipicamente alti 2-4 piani. La qualità dei muri portanti in pietra si è dimostrata variabile.

Tra le costruzioni del 18° secolo, è evidente che quelle che hanno retto bene la scossa del 6 aprile erano state rinforzate precedentemente. Basandosi sull'osservazione dei danni esterni si può stimare che circa una costruzione su tre del centro de L'Aquila presenta almeno danni di basso livello ai muri portanti; molte hanno anche danni interni come collassi di muri e pavimenti.

In aree vicino alla parte fortificata, alcuni edifici hanno struttura di cemento armato e sono stati costruiti tra il 1970 e il 1990. Molte di queste costruzioni hanno presentato danni e tre sono completamente collassate.

I danni più diffusi osservati a L'Aquila consistono in crepe nelle pareti in muratura, in particolare tra le aperture (finestre, porte) e agli angoli, perdita dell'intonaco superficiale e in alcuni casi collassi di cornicioni debolmente rinforzati.

Nel centro storico de L'Aquila i collassi completi di costruzioni in muratura sono stati rari, anche se i gravi danni osservati in molti muri potrebbero causare la demolizione di alcune costruzioni. Si sono incontrati

anche danni ai piani all'interno delle abitazioni, ciò rende la struttura irrecuperabile. Il collasso dei piani potrebbe essere causato dalla deformazione dei muri e dalla successiva perdita del supporto per le travi del pavimento.

La maggior resistenza di molti edifici in muratura a L'Aquila può essere attribuita alla migliore qualità del materiale e delle costruzioni che potrebbero essere state scelte dalle famiglie ricche che occupavano le abitazioni precedentemente. Diverse costruzioni in muratura presenti nel centro storico avevano catene con lo scopo di limitare la deformazione delle costruzioni. Queste strutture hanno generalmente retto bene, mostrando solo piccole crepe sui muri e agli angoli.

5.2.2 Visita della città e attribuzione dei gradi di danno ad alcune costruzioni

La visita alle zone accessibili a L'Aquila (in figura 5.5 vi sono numerate alcune foto significative scattate durante il percorso) è iniziata dalla stazione ferroviaria; inizialmente sono state percorse le mura in strade a grande percorrenza risalendo via 25 aprile, via Vicentini, viale della Croce Rossa, via Panella, via Strinella fino a viale Cadorna dove si trova la stazione dei bus (figura 5.4), in seguito si è raggiunta piazza del Duomo passando da viale Collemaggio, viale Crispi ed infine corso Federico II fino all'incrocio con la piazza principale.



Figura 5.4. Stazione dei bus posta ai piedi della collina contenente il centro storico (foto di inizio settembre 2009)



Figura 5.5. Mappa del centro della città de L'Aquila. I numeri in rosso corrispondono alle foto presentate in seguito, i numeri in blu i gradi di danno degli edifici analizzati

Figura 5.6. (n. 1 nella mappa)

Crollo parziale di un muro nei pressi della stazione ferroviaria



Figura 5.7. (n. 2 nella mappa)

Tipo di struttura: Muratura armata o confinata

Grado di danno: 4

Commento: Grandi fratture sui muri del piano superiore e parziale perdita della connessione tra i muri esterni portano a pesanti danni strutturali, non vi sono parti della costruzione completamente collassate al suolo

Figura 5.8. (n. 3 nella mappa)

Tipo di struttura: Struttura in cemento armato

Grado di danno: 2

Commento: Danni non strutturali moderati dovuti alla caduta di parte della copertura in mattoni del muro esterno





Figura 5.9. (n. 4 nella mappa)

Tipo di struttura: Muratura non armata (pietre sbozzate)

Grado di danno: 3

Commento: Grandi crepe sul muro esterno, crepa profonda al lato del balcone e parziale crollo in corrispondenza della finestra a piano terra. Danni strutturali moderati e danni non strutturali gravi

Figura 5.10. (n. 5 nella mappa)

Tipo di struttura: Struttura in cemento armato

Grado di danno: 2

Commento: Gran parte delle tegole del tetto sono scivolate, non vi sono gravi danni ai muri; all'interno della stazione si è verificato il crollo di componenti non strutturali.



A fianco di questo edificio si trova la stazione di registrazione AQK

Figura 5.11. (n. 6 nella mappa)

Caduta del cornicione e sollevamento di mattoni in viale Collemaggio



Figura 5.12. (n. 7 nella mappa)

Tipo di struttura: Struttura in cemento armato

Grado di danno: 2

Commento: Estese crepe verticali sul muro sufficienti a costituire un lieve danno strutturale



Figura 5.13. (n. 8 nella mappa)

Tipo di struttura: Cemento armato

Grado di danno: 3

Commento: Grandi crepe diagonali sui muri non molto gravi, non è crollata nessuna parte del muro

Figura 5.14. (n. 9 nella mappa)

Tipo di struttura: Cemento armato

Grado di danno: 4

Commento: I muri esterni del piano terra crollati, non vi sono parti della costruzione completamente crollate al suolo; questo è un danno non strutturale molto pesante





Figura 5.15. (n. 10 nella mappa)

Tipo di struttura: Muratura non armata

Grado di danno: 2

Commento: Danno moderato consistente in fessure nella pareti e distacco di alcune porzioni di intonaco

Figura 5.16. (n. 11 nella mappa)

Particolare di una colonna portante gravemente danneggiata appartenente al palazzo dell'istituto nazionale per l'assicurazione contro gli infortuni sul lavoro in corso Federico II



Figura 5.17. (n. 12 nella mappa)

Campanile danneggiato nel centro de L'Aquila



Figura 5.18. (n. 13 nella mappa)

Duomo de L'Aquila non gravemente danneggiato

Figura 5.19. (n. 14 nella mappa)

Chiesa di Santa Maria del Suffragio con la cupola in fase di ristrutturazione. Ai lati della chiesa i palazzi hanno presentato danni da trascurabili a leggeri, quindi di grado 1



Figura 5.20. (n. 15 nella mappa)

Particolare della pavimentazione danneggiata in piazza del Duomo



Figura 5.21. (n. 16 nella mappa)

Tipo di struttura: Muratura non armata

Grado di danno: 3

Commento: Parziale collasso della parte superiore, non vi sono elementi strutturali collassati, si presenta un danno moderato

Figura 5.22. (n. 17 nella mappa)

Tipo di struttura: Struttura in cemento armato

Grado di danno : 3

Commento: Esempio di edificio in cemento armato nel centro città; presenta danni non irrilevanti nella parte bassa e allo spigolo sinistro



Uno dei simboli del terremoto che ha colpito la città de L'Aquila è l'hotel Duca degli Abruzzi (figura 5.23) completamente collassato in seguito alla scossa del 6 aprile. Questa distruzione ha fatto notizia in quanto l'hotel era un edificio moderno, pur avendo subito un danno di grado 5. La causa si può ricercare nella presenza del piano terra debole, tipologia di costruzione certamente molto svantaggiosa per resistere alle azioni sismiche. E' però utile sottolineare che costruzioni simili a quelle dell'hotel, che si intravedono nella foto di figura 5.23, hanno retto la scossa senza presentare gravi danni.



Figura 5.23. Hotel Duca degli Abruzzi (in alto dopo la scossa del 6 aprile, in basso prima della scossa) situato in Viale Giovanni XXIII a L'Aquila



5.2.3 Considerazioni riguardanti il grado di intensità macrosismica attribuito a L'Aquila

Nonostante il campione di foto fatte in prima persona ad inizio settembre 2009 sia statisticamente insufficiente, e quindi fornisce solo indicazioni approssimative, si è scelto di considerare i livelli di danno stimati osservando le foto, dalle quali è possibile attribuire un grado di intensità macrosismica secondo le distribuzioni in tabella 5.1. Supponendo una classe di vulnerabilità B (come confermato nel report completato dal gruppo EEFIT) si stima un grado di intensità non superiore a 7 in quanto le foto presentano per il 20% danno di grado 4, per il 25% di grado 3, per il 45% di grado 2 e per il 10% di grado 1.

Il grado di intensità stimato approssimativamente osservando le immagini risulta perlomeno di 1,5 gradi inferiore a quello stimato dalle squadre di lavoro. Preme sottolineare che le foto sono state scattate generalmente alle costruzioni “più impressionanti” in quanto maggiormente danneggiate, quindi la stima del danno basata sulle immagini può darsi che sovrastimi a sua volta l’intensità macrosismica.

La tabella 5.1 si riferisce alla scala europea delle intensità (intensità MSK) mentre la stima eseguita dalle squadre di lavoro si riferisce alla scala MCS; in questo caso è possibile trattare in maniera indifferenziata le due scale in quanto si discostano di poco, come mostrato in figura 7.3 (Medvedev et al., 1963).

Come precedentemente illustrato, sono state percorse le vie della città che dalla stazione ferroviaria arrivano alla stazione dei bus (dove si trova la stazione di registrazione AQK) salendo fino al centro storico ed esattamente alla piazza del Duomo. Dato che le squadre di lavoro hanno attribuito il grado di intensità macrosismica basandosi esclusivamente sul centro storico de L’Aquila, può essere che la stima approssimativa fatta utilizzando le foto scattate in prima persona non coincida con quella dell’INGV, poiché le foto sono state fatte anche nella zona esterna al centro, in cui si sono presentati meno danni a causa di una vulnerabilità del costruito minore e delle differenti condizioni topografiche.

Tabella 5.1. Distribuzione del danno secondo la scala europea delle intensità (intensità MSK)

Grado di intensità	Classe A		Classe B		Classe C	
	%	Grado di danno	%	Grado di danno	%	Grado di danno
V	5 95	1 0	100	0	100	0
VI	5 50 45	2 1 0	5 95	1 0	100	0
VII	5 50 35 10	4 3 2 1	50 35 15	2 1 0	50 50	1 0
VIII	5 50 35 10	5 4 3 2	5 50 35 10	4 3 2 1	5 50 35 10	3 2 1 0
IX	50 35 15	5 4 3	5 50 35 10	5 4 3 2	5 50 35 10	4 3 2 1
X	75 25	5 4	50 35 15	5 4 3	5 50 35 10	5 4 3 2
XI	100	5	75 25	5 4	50 50	5 4
XII	–	–	100	5	100	5

Le squadre di lavoro hanno attribuito un grado di intensità riferendosi al solo centro storico, in quanto la differente tipologia delle costruzioni ha reso impossibile attribuire un unico valore all’intera città, quindi si potrebbe stimare il livello di danno basandosi sui danni subiti dal Duomo o dalla Chiesa di Santa Maria del Suffragio, entrambe ubicate nel centro della città; certamente basarsi su un’unica costruzione per stabilire il grado di intensità macrosismica non è un metodo corretto, quindi questa osservazione è stata fatta solo a

titolo informativo. Nella figura 5.24 sono riportate due foto della chiesa di Santa Maria del Suffragio prima e dopo la scossa del 6 aprile. Generalmente chiese del periodo di quella di Santa Maria del Suffragio (del XVIII secolo), se subiscono un danno pari a quello presentato in seguito al terremoto del 6 aprile, significa che il grado di intensità macrosismica è tra 6 e 7. Le chiese sono strutture più vulnerabili rispetto alle abitazioni, quindi il livello di danno non si può stabilire con gli stessi criteri nei due casi. Si è potuto stabilire il grado di intensità macrosismica indicativo osservando i danni alla chiesa, basandosi sull'esperienza personale del professore Astroza dell'Universidad de Chile nell'osservare i danni agli edifici religiosi nei diversi livelli di intensità macrosismica dei paesi, stabiliti osservando le percentuali di danneggiamento alle abitazioni (ossia nella maniera usuale).

In appendice C si trova la scheda di valutazione e censimento dei danni della Chiesa di Santa Maria del Suffragio.



Figura 5.24. Chiesa di Santa Maria del Suffragio prima della scossa del 6 aprile (a sinistra) e dopo (a destra)

5.3 Castelnuovo (MCS 9 - 10)

Castelnuovo si trova sulla sommità di una collina a 10-70 m sopra il piano alluvionale, ed è situato a 810-860 mslm su una collina costituita da depositi fluvio-lacustri del medio Pleistocene. La parte alta del paese è un'unità erosa del Pleistocene di sabbie cementate debolmente con ghiaia e conglomerati (Bosi e Bertini, 1970; Bertini et al., 1989). Questa unità si trova sopra un limo carbonatico erodibile della formazione San Nicandro che fu erosa dal fiume Aterno durante il Pleistocene. I depositi fluviali ed alluvionali dell'Olocene hanno colmato le depressioni topografiche e circondato il lato sud ed est del paese (figura 5.25, 5.26). Castelnuovo si trova a 25 km a sud-est dell'epicentro della scossa del 6 aprile.

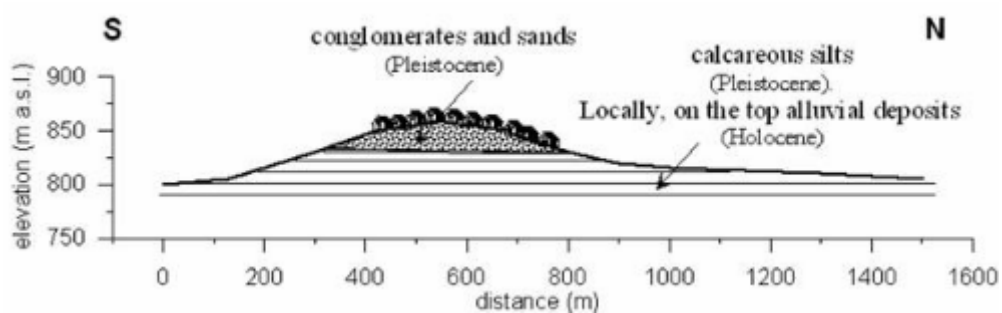


Figura 5.25. Sezione geologica della collina (Bosi e Bertini, 1970)

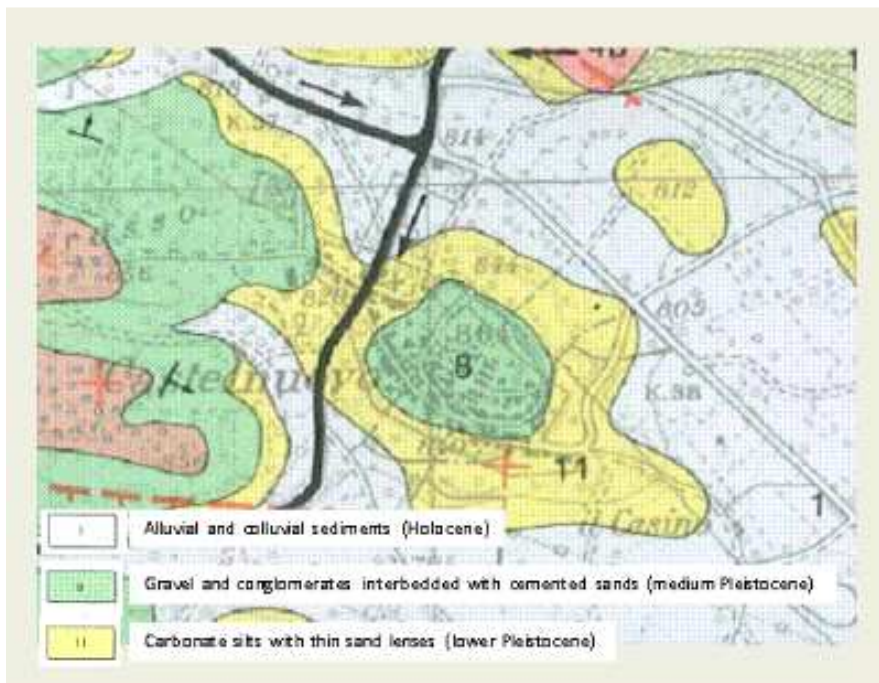


Figura 5.26. Mappa geologica di Castelnuovo (Bertini et al., 1989)

In questo paese il terremoto del 6 aprile ha causato la morte di 5 persone; durante la visita sul posto si è avuta l'occasione di parlare col proprietario dell'unica casa rimasta abitabile, il quale ha spiegato che se il

terremoto si fosse presentato la settimana seguente, corrispondente ai giorni della festività pasquale, il numero di morti a Castelnuovo sarebbe stato molto maggiore, poiché la maggior parte degli abitanti di questo paese vivono in altre città e sarebbero tornati per le vacanze di Pasqua.

Il paese è formato da edifici di 2-3 piani in muratura non armata. Alcune strutture erano state rinforzate da catene. La scossa è stata sufficientemente forte da danneggiare significativamente (danni del grado 2 o maggiori) quasi tutto il paese, con la maggior parte delle strutture della parte alta della collina o crollate o prossime al collasso (danni di grado 3-5).

Nell'area alla base del paese la maggior parte delle strutture non sono crollate in seguito all'evento, i livelli di danno 4 e 5 si sono verificati in circa il 25% degli edifici, mentre nella parte alta della collina i livelli D4-D5 sono stati del 80-90%.

A Castelnuovo è stata assegnata intensità di grado IX-X.

Le figure 5.27 e 5.28 illustrano la differenza tra i danni rispettivamente nella parte alta del paese e nella parte bassa, differenza dovuta alla diversa tipologia di costruzioni tra le due zone ed all'effetto dell'amplificazione topografica.

Le figure dalla 5.29 alla 5.34 sono presentate nello stesso ordine temporale in cui sono state scattate; il percorso seguito è iniziato a metà della collina dove è ubicato il paese (figura 5.29 e 5.30), si è arrivati poco sotto la piazza della chiesa (figura 5.31, 5.32, 5.33) e poi si è ridiscesi fino alla base della collina (figura 5.34).



Figura 5.27. Collasso di alcune abitazioni della parte alta del paese di Castelnuovo. In questa zona le strutture sono principalmente in muratura in pietra grezza (a sacco di ciottoli, pietrame, mista) (foto di inizio settembre 2009)



Figura 5.28. Alcune abitazioni della zona bassa di Castelnuovo. In questa parte del paese si trovano sia costruzioni in pietra grezza che in pietre squadrate (foto di inizio settembre 2009)



Figura 5.29 Castelnuovo

Tipo di struttura: Pietra grezza

Grado di danno: 4

Commento: Collasso dei muri che ha causato un parziale crollo del tetto, non si è verificato un collasso dei piani; in questo caso si presentano danni strutturali gravi e non strutturali molto gravi

Figura 5.30 Castelnuovo

Tipo di struttura: Pietra grezza

Grado di danno: 5

Commento: i muri sono collassati completamente causando la caduta del tetto, si è quindi mostrata una distruzione completa





Figura 5.31 Castelnuovo

Tipo di struttura: Pietra grezza

Grado di danno: 5

Commento: La maggior parte dei muri è crollata così come il tetto e parte del pavimento del lato destro dell'edificio; danni strutturali gravissimi

Figura 5.32 Castelnuovo

Tipo di struttura: Pietre sbozzate o a spacco

Grado di danno: 2

Commento: La grande fessura estesa lungo tutta l'altezza dell'edificio conferisce un leggero danno strutturale

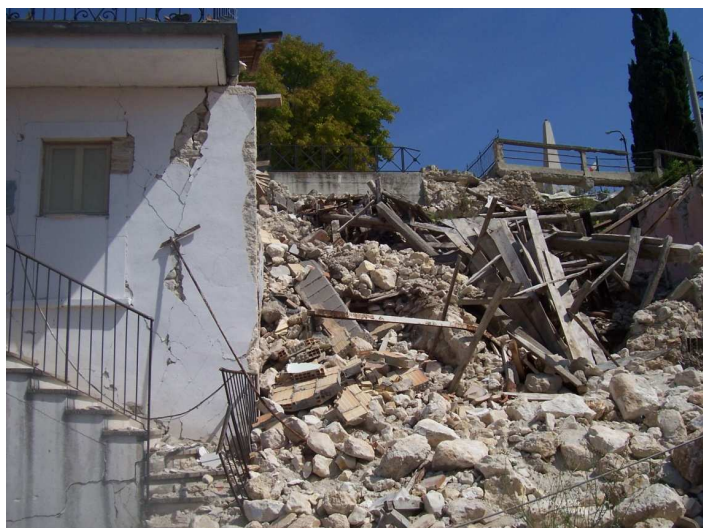


Figura 5.33 Castelnuovo

Tipo di struttura: Edificio di destra pietra grezza, quello di sinistra pietre sbozzate

Grado di danno: A destra 5, a sinistra 3

Commento: L'edificio di destra è crollato completamente, quello di sinistra presenta numerose crepe e la caduta localizzata di intonaco del muro



Figura 5.34 Castelnuovo

Tipo di struttura: Muratura non armata

Grado di danno: 2

Commento: Lieve danno strutturale visibile dalle crepe lungo il lato sinistro della struttura, non sono presenti gravi danni ai muri

5.4 Monticchio (MCS 6)

Monticchio dista 11 km dall'epicentro, si trova sul lato destro della valle del fiume Aterno ad un'altezza di circa 600 m. Fu costruito su un pendio dolce ai piedi della parte più settentrionale della montagna Cavalletto. Nella parte a sud-est del paese vi sono degli affioramenti di calcare Giurassico (figura 5.35). In altre parti di Monticchio, questa formazione è ricoperta da carbonati del Pleistocene, dello spessore di almeno 100 m (Bosi e Bertini, 1970).



Figura 5.35. Affioramenti di calcare Giurassico

Il paese è formato principalmente da edifici di 2-3 piani in muratura e parzialmente da strutture in cemento armato. Il gruppo QUEST (QUick Earthquake Survey Team) ha attribuito un'intensità macrosismica di grado VI; danni di grado D0-D1 sono stati osservati su entrambe le tipologie di strutture.



Figura 5.36 Monticchio

Tipo di struttura: Pietra grezza

Grado di danno: 0

Commento: Questa costruzione non ha subito alcun danno in seguito alla scossa del 6 aprile ed è rimasta abitabile

Figura 5.37 Monticchio

Tipo di struttura: Pietre sbazzate o a spacco

Grado di danno: 2

Commento: Lunga fessura sul muro e distacco di una circoscritta parte di intonaco, ciò è sufficiente a costituire lievi danni strutturali



5.5 San Gregorio (MCS 9)

San Gregorio si trova sul fianco ovest della valle dell'Aterno a 600 m di altitudine; ad una distanza dall'epicentro di 14 km. In seguito alla scossa del 6 aprile sono morte 8 persone. Il paese si estende su diverse formazioni geologiche (figura 5.38): la parte ovest si trova su depositi fluvio-lacustri di ghiaie e conglomerati (questa parte del paese è illustrata nella mappa seguente Bosi e Bertini, 1970); il centro storico fu costruito su depositi alluvionali; nella parte est del paese affioramenti di calcare del Miocene.

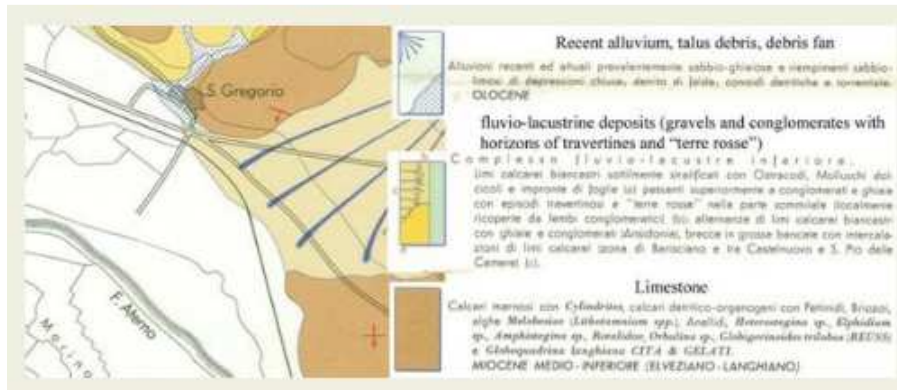


Figura 5.38. Mappa geologica di San Gregorio (Bosi e Bertini, 1970)

L'intensità macrosismica di San Gregorio ha raggiunto il grado IX e i danni si sono concentrati principalmente nel centro storico ubicato sui depositi alluvionali. Nel centro una parte significativa delle case sono di due o tre piani, in muratura di pietra (figura 5.40), la maggior parte in muratura di bassa qualità e crollate, compresa la chiesa ($D\%=75\%$ e $D_4=25\%$). La parte ovest del paese era costruita su conglomerati e ghiaie del Pleistocene e non ha presentato particolari danni (50% D2, 25% D1 e 25% D0); la parte est, costituita soprattutto da edifici in cemento armato (figura 5.39 e 5.42), costruita sia su calcari che depositi alluvionali ha presentato diversi livelli di danno (30% D4, 40% D3, 30% D2, 10% D1) (Di Capua et al., 2009).

Nella figura 5.39 sono riportati due esempi di danni gravi a strutture in cemento armato situate nella zona est del paese.

Nel caso di San Gregorio sono state notate due caratteristiche particolari: la prima è che si tratta di centro più lontano da L'Aquila, in direzione sudest, nella quale strutture in cemento armato hanno presentato danni leggeri o moderati; la seconda è che è stato trovato in una costruzione di cemento armato un piano crollato.



Figura 5.39. Esempi di danni gravi ad edifici in cemento armato a San Gregorio



Figura 5.40 San Gregorio

Tipo di struttura: Pietre sbozzate

Grado di danno: 5

Commento: Entrambi i piani hanno ceduto, così come il muro ed il tetto; questi sono danni strutturali gravissimi

Figura 5.41 San Gregorio

Tipo di struttura: Muratura armata o confinata

Grado di danno: 4

Commento: Gravi crepe sul muro, parziale perdita della connessione dei muri esterni, ciò rappresenta pesanti danni strutturali





Figura 5.42 San Gregorio

Tipo di struttura: Struttura in cemento armato

Grado di danno: 4

Commento: Parte del muro esterno completamente crollato, crepe estese presenti in diversi punti; questo è un danno strutturale grave.



5.6 Paganica (MCS 8)

Anche il centro storico di Paganica è composto principalmente di costruzioni in muratura di 2-3 piani con le travi del tetto in legno. Una caratteristica particolare di queste costruzioni è l'uso di travi in acciaio nei solai. Questa è la differenza con gli altri centri dove sono state invece utilizzate travi in cemento armato prefabbricate.

La maggior parte (circa il 90%) delle strutture in muratura osservate presentano un danno di grado 4 o 5 (Di Capua et al., 2009). La presenza delle travi ha fatto evitare il crollo dei muri esterni ma non ha evitato il collasso dei piani interni. Delle differenze nella qualità dei materiali avrebbero ampiamente ridotto molti danni sostanziali. In periferia rispetto al centro della città, vi sono abitazioni recenti in cemento armato e pareti di mattoni di argilla o blocchi di cemento; tali edifici hanno presentato danni lievi od assenti.

A Paganica si è osservato un esempio di edifici moderni ben costruiti: una serie di case residenziali moderne di 3 piani sono rimaste intatte in seguito alla forte scossa, nonostante si trovino vicino al centro dove il 90% delle case in muratura sono state danneggiate (Di Capua et al., 2009).



Figura 5.43. Chiesa a Paganica in fase di ristrutturazione (foto di inizio settembre 2009)



Figura 5.44 Paganica

Tipo di struttura: Muratura non armata

Grado di danno: 4

Commento: L'instabilità della struttura e la mancanza di connessione tra i muri esterni sono visibili dalla presenza di crepe profonde

5.7 Coppito (MCS 6 - 7)

La frazione di Coppito appartiene al comune de L'Aquila dalla quale dista 5,3 km in direzione nord-ovest, sorge a 650 mslm ed ha una popolazione di 3059 abitanti.

A Coppito si trova la caserma della guardia di finanza e il 9 aprile, a seguito della richiesta fatta dal Dipartimento Nazionale della Protezione Civile (DPC), è stato allestito il Centro Operativo Emergenza Sismica (COES) dell'INGV presso in DICOMAC (Direzione di COMAndo e Controllo - ovvero la struttura centrale del DPC che coordina gli interventi nelle zone colpite dal sisma).

In questa località si trovano le stazioni di registrazione AQA e AQG appartenenti alla microrete dell'Aterno.



Figura 5.45 Coppito

Tipo di struttura: Muratura non armata

Grado di danno: 2

Commento: Sul muro esterno si notano crepe superficiali soprattutto in prossimità delle finestre; questi sono danni strutturali leggeri

5.8 Conclusioni

In seguito alla visita diretta in sito, si è osservato che diversi centri colpiti dal sisma hanno subito livelli di danno molto differenziati, ciò dipende sostanzialmente dalle caratteristiche topografiche (principale causa della distruzione di Castelnuovo), dalla geologia locale e parzialmente dalla direttività correlata alla faglia responsabile del terremoto del 6 aprile. Inoltre i danni osservati variano sostanzialmente in base alla localizzazione, alla tipologia di costruzione, all'età e alle condizioni dell'edificio.

L'attribuzione del grado di intensità macrosismica è importante in quanto rappresentativo del livello di danno; la differenza di anche solo un grado descrive scenari di distruttività nettamente differenti: ad esempio tra Paganica (intensità 8) e San Gregorio (intensità 9) si passa da una località fortemente danneggiata ad una rasa al suolo.

A L'Aquila gli edifici di cemento armato hanno generalmente retto bene senza presentare danni strutturali, inoltre le costruzioni precedentemente rinforzate si sono comportate meglio rispetto alle altre; nel capoluogo i danni sono stati minori rispetto ad alcuni paesi circostanti, grazie all'uso di materiali migliori durante la costruzione. Si può stimare che circa una costruzione su tre del centro de L'Aquila presenta almeno un danno di basso livello ai muri portanti, molte hanno anche danni interni (collassi di pareti e pavimenti), nel centro storico i collassi completi sono stati rari anche se i gravi danni osservati potrebbero causare la demolizione di alcuni edifici.

Il grado di intensità macrosismica stabilito dal gruppo QUEST appartenente all'INGV per la città de L'Aquila si riferisce alla sola zona del centro storico, quindi tale valore non è direttamente attribuibile all'intera città.

6 Registrazioni accelerometriche

6.1 Introduzione

Nel presente capitolo si presenta la fitta rete di strumenti che hanno registrato la scossa principale del terremoto del 6 aprile 2009, con la principale caratteristica di avere ben 5 stazioni sulla proiezione del piano di faglia in superficie, 4 delle quali probabilmente si trovano in corrispondenza di una asperità della faglia.

Vengono analizzati gli accelerogrammi, i velocigrammi ed i sismogrammi, prestando particolare attenzione al primo impulso della registrazione forse causato dalla presenza dell'asperità più vicina agli strumenti di registrazione.

Si presentano i dati relativi al terremoto dell'aquilano confrontati con l'andamento generale della relazione di attenuazione di Akkar e Bommer, vengono analizzati gli spettri di risposta ed i rapporti spettrali.

In questo capitolo si considerano anche le registrazioni della stazione AQM, nonostante non siano state ritenute valide; l'ultimo paragrafo è completamente dedicato ad uno studio riguardante la stazione AQM e gli aspetti che mostrano la validità di diverse considerazioni derivanti dai dati registrati da questo strumento.

6.2 Caratteristiche geologiche e geografiche delle stazioni di registrazione

L'evento sismico del 6 aprile 2009 è stato registrato da 57 stazioni accelerometriche delle RAN (Rete Accelerometrica Nazionale, gestita dal dipartimento della Protezione Civile), alcune delle quali ubicate nella città de L'Aquila (stazione AQK) o nella porzione della Valle Aterno a NW della città (AQA,AQF,AQG,AQM,AQP,AQV). In figura 6.1 è riportata la distribuzione delle 57 stazioni italiane, è una rappresentazione utile per osservare l'alta densità di registrazione per il terremoto del 6 aprile 2009.



Figura 6.1. Localizzazione indicativa delle 57 stazioni di registrazione del terremoto del 6 aprile 2009(INGV)

Tabella 6.1. Elenco delle stazioni di registrazione e relativo anno di installazione (Fonte: INGV)

Stazione	Anno	Stazione	Anno	Stazione	Anno	Stazione	Anno
ANT	2007	CHT	2005	MMP	2003	SEP	2003
AQA	2001	CLN	2003	MNG	2008	SNM	2004
AQG	2001	CMB	2007	MNN	2008	SNS	2005
AQK	2005	CMR	2007	MTR	2004	SPC	2005
AQV	2001	CNM	2003	NAP	2007	SPO	2005
ASS	1997	CSO1	2008	ORC	2002	SSR	2007
AVL	2002	CSS	2007	PDM	2005	STL	2003
AVZ	2001	CTL	2007	PIC	2007	STN	2002
BBN	2003	FMG	2004	PTF	2007	SUL	2007
BDT	2003	FOR	2005	RIC	2007	TLS	2002
BNE	2002	GNL	2007	SBC	2003	TMO	2007
BOJ	2004	GSA	2001	SCM	2003	VIE	2008
CAN	2008	GSG	2001	SCP	2007	VRP	2002
CDS	2004	LSS	2003	SDG	2008	AQM	1997
CER	2007						

Nel seguente studio si analizzano gli accelerogrammi delle 18 stazioni più prossime all'epicentro della scossa principale (AQA, AQG, AQK, AQM, AQV, ANT, AVZ, BOJ, CDS, CHT, CLN, CSO1, FMG, GSA, GSG, MTR, ORC, SUL).

Le stazioni di maggior interesse sono risultate essere quelle posizionate nella Valle del Fiume Aterno la cui geologia è indicata nella figura 6.2. Le informazioni geologiche sono tratte dalla Carta Geologica d'Italia in scala 1:100.000 – Foglio n. 139 L'Aquila.

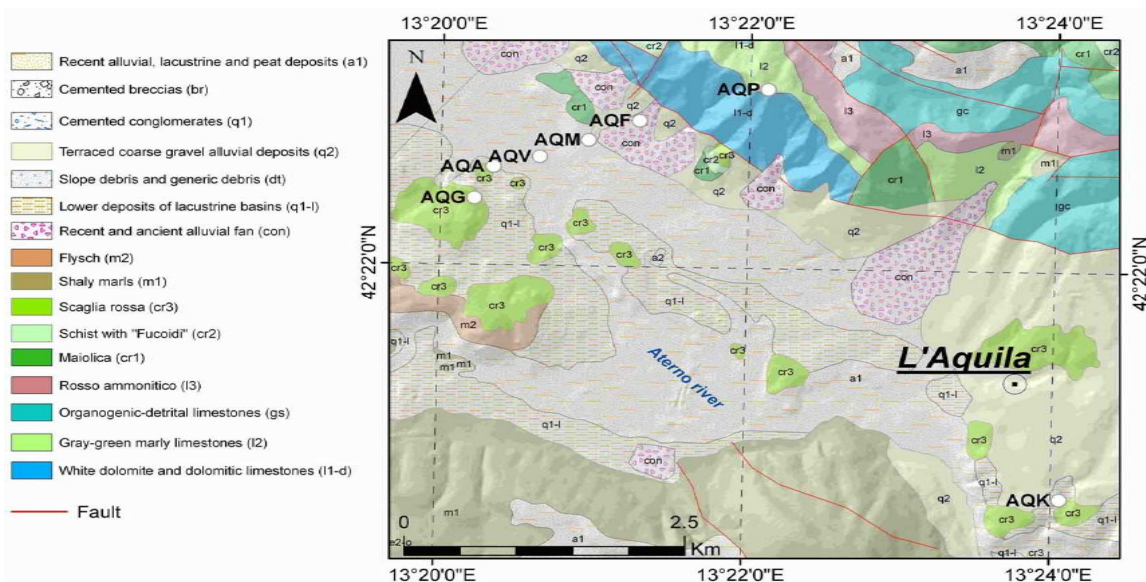


Figura 6.2. Carta geologica della Valle dell'Aterno in corrispondenza di L'Aquila (INGV)

Nella figura 6.2 si nota che la stazione AQK, nei pressi del centro storico di L'Aquila, è ubicata sui depositi inferiori lacustri, costituiti da sabbie e conglomerati (q1-l). Le stazioni che si trovano invece a NW del centro

abitato sono posizionate lungo un transetto che attraversa da SW a NE la Valle dell'Aterno e pertanto risultano ubicate in condizioni morfologiche e litologiche differenti. Le stazioni AQG e AQP sono su roccia, costituita da depositi prevalentemente calcarei e calcareo-marnosi. Le stazioni AQA, AQV, AQM e AQF sono invece poste su terreni alluvionali recenti, prevalentemente sabbioso-conglomeratici (fonte: INGV).

Nella figura 6.2 è riportata anche la traccia della faglia di Pettino (a NNW di L'Aquila), orientata in direzione NW-SE. In questo tratto della Valle dell'Aterno, questo elemento tettonico borda il lato orientale della pianura. A seguito dell'evento sismico del 6 aprile lungo la faglia sono stati osservati fenomeni di mobilitazione co-sismica dell'ordine di alcuni cm (EMERGEO Working Group, 2009).

La stazione AQK è ubicata all'imbocco della galleria pedonale che consente l'accesso al centro storico della città dal parcheggio del terminal delle autolinee regionali (figura 6.3). La figura 6.4 illustra gli affioramenti presenti nelle vicinanze della postazione accelerometrica, costituiti da brecce ad elementi eterometrici di natura calcarea, ben cementate, di età pleistocenica. Si noti che dietro la stazione di registrazione AQK si trova la collina che contiene il centro della città; la pendenza dalla parte della stazione è completamente disabitata, per accedere al centro della città si deve percorrere Viale Collemaggio che si trova nei pressi della stazione.



Figura 6.3. Postazione accelerometrica AQK (dietro la stazione dei bus)

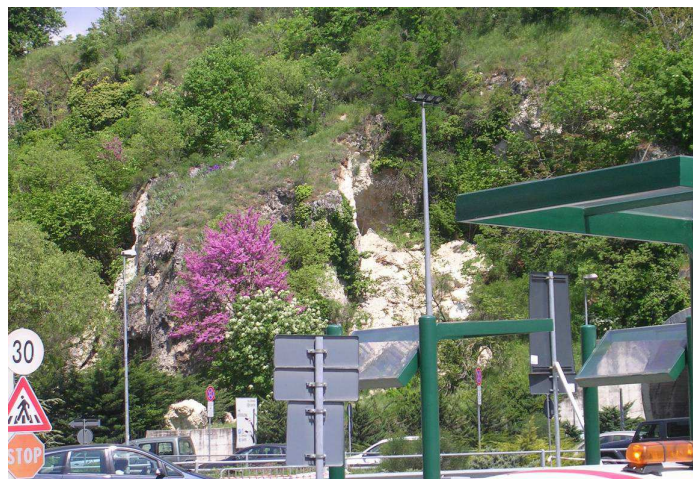


Figura 6.4. Affioramenti nelle vicinanze della postazione accelerometrica AQK

La stazione AQV è ubicata al centro della Valle dell'Aterno; la stazione AQG è invece ubicata su Colle Grilli, in destra idrografica del fiume Aterno; la postazione AQA è sita sulla sponda del fiume Aterno, in destra idrografica.

Nella figura 6.5 è riportata una foto scattata dalla sommità di Colle Grilli (in destra idrografica del Fiume Aterno) che mostra l'allineamento delle stazioni presenti nel transetto della Valle del Fiume Aterno.



Figura 6.5. Postazioni accelerometriche AQA, AQF, AQG, AQM e AQV nella Valle dell'Aterno. Le frecce indicano il tracciato della Faglia di Pettino

Nella tabella 6.2 sono schematizzate le caratteristiche geografiche (latitudine, longitudine e altezza sul livello del mare) e le proprietà del suolo (tipo di suolo e $V_{s,30}$) delle 18 stazioni presso le quali è stata registrata la scossa principale del 6 aprile 2009 (sito INGV).

Nelle figure 6.6 e 6.7 sono riportate in maniera visuale rispettivamente le distanze reciproche e rispetto all'epicentro delle 18 stazioni considerate e delle 5 stazioni più prossime all'epicentro situate nel comune de L'Aquila.

Tabella 6.2. Caratteristiche geografiche e proprietà del suolo delle 18 stazioni più prossime all'epicentro

Codice	Lat	Long	Elev (m.a.s.l.)	EC8	$v_{s,30}$ (m/s)	Codice	Lat	Long	Elev (m.a.s.l.)	EC8	$v_{s,30}$ (m/s)
ANT	42,418	13,079	568	A	1000	CHT	42,370	14,148	109	B	387
AQA	42,376	13,339	693	B	475	CLN	42,085	13,521	803	A	1000
AQG	42,373	13,337	721	A	1000	CSO1	42,101	13,088	717	B	515
AQK	42,345	13,401	726	B	455	FMG	42,268	13,117	1071	A	1000
AQM	42,379	13,349	724	A	1000	GSA	42,421	13,519	1062	A	1000
AQV	42,377	13,344	692	B	475	GSG	42,460	13,550	1200	A	1000
AVZ	42,027	13,426	746	C	120	MTR	42,524	13,245	975	B	515
BOJ	41,484	14,472	537	B	400	ORC	41,954	13,642	732	C	354
CDS	41,787	14,112	932	B	515	SUL	42,089	13,934	556	A	1000

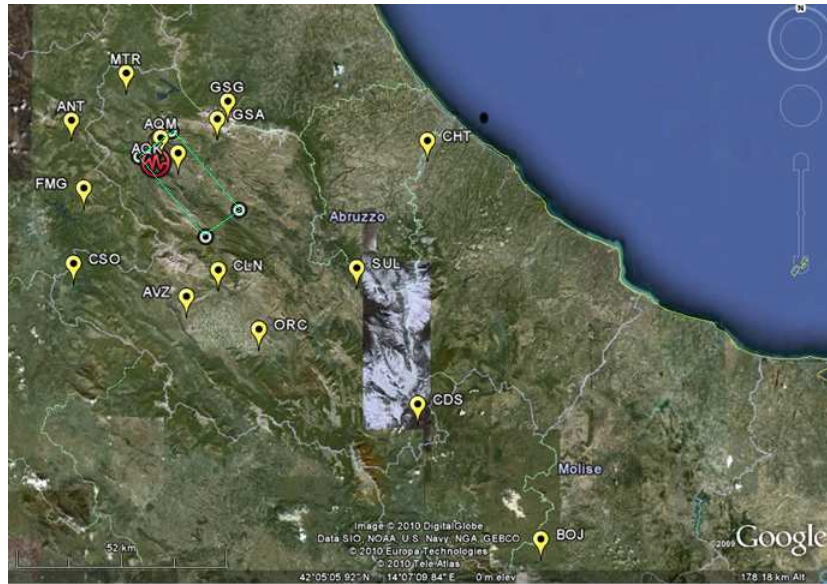


Figura 6.6. Posizione delle stazioni aventi le registrazioni accelerometriche. In rosso è indicato l'epicentro della scossa principale del 6 aprile 2009, il rettangolo in verde rappresenta la proiezione della faglia in superficie

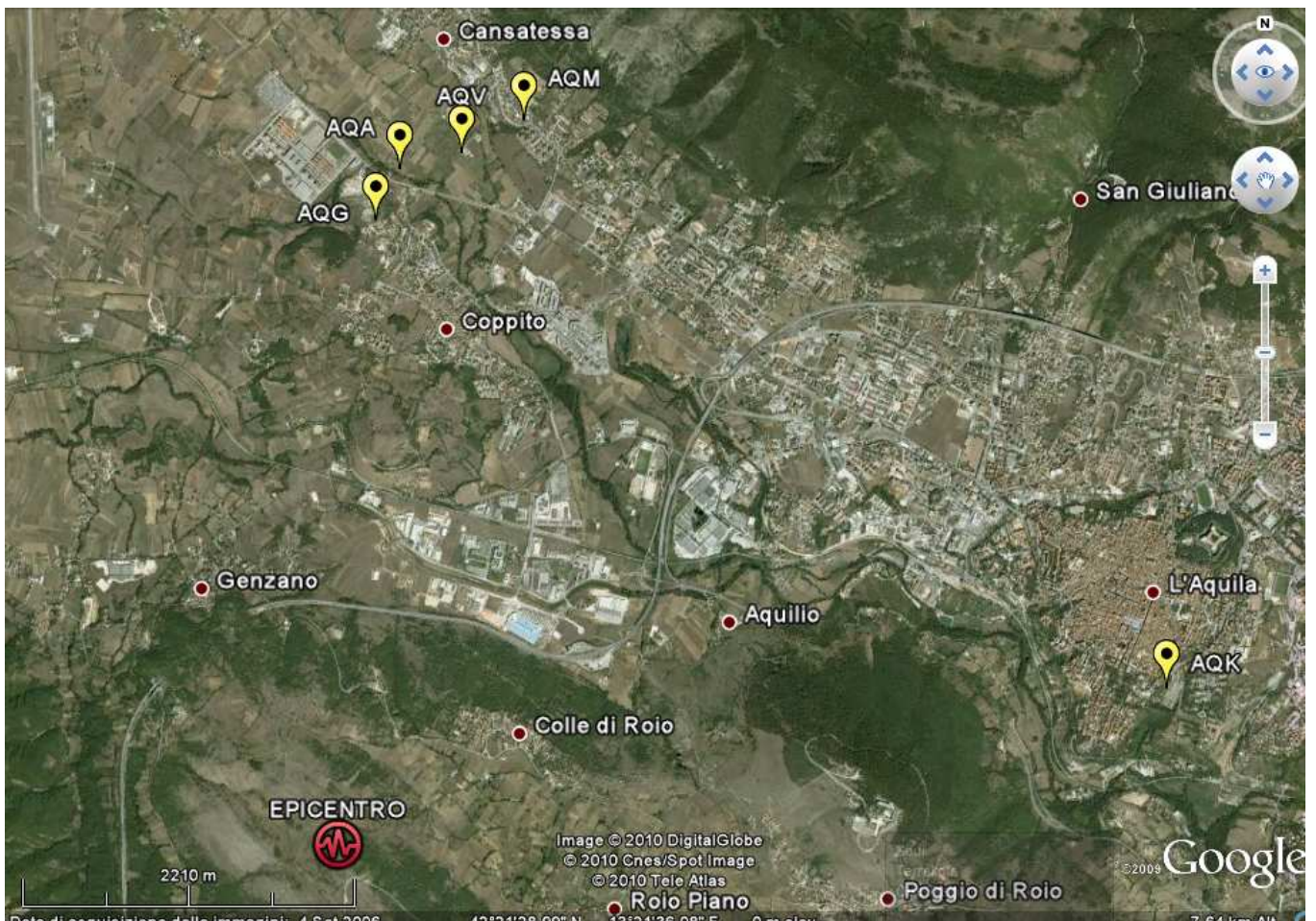


Figura 6.7. Posizione delle stazioni situate nel comune de L'Aquila. In rosso è indicato l'epicentro della scossa principale del 6 aprile 2009

6.3 Valori registrati

Nella tabella 6.3 sono schematizzati i valori del raggio epicentrale, l'accelerazione e la velocità di picco delle 18 stazioni presso le quali è stata registrata la scossa principale del 6 aprile 2009.

Come si può facilmente notare, la stazione più prossima all'epicentro risulta essere la AQG (a 4 km di distanza), mentre la più lontana si trova a 133 km ed è la stazione BOJ situata a Bojano.

Il valore massimo di PGA (PGV) è 11,47 m/s² (0,44 m/s) registrato nella stazione AQM (L'Aquila-V. Aterno-Il Moro), ma in generale tutti i PGA delle stazioni ubicate sulla proiezione della faglia in superficie (AQA, AQG, AQK, AQM e AQV) sono maggiori di 3,5 m/s² e i PGV sono maggiori di 0,3 cm/s.

Tabella 6.3. Stazioni più prossime all'epicentro aventi le registrazioni della scossa principale (ITACA), ordinate secondo il valore del raggio epicentrale

	Codice	R epi (km)	PGA (m/s ²)	PGV (m/s)		Codice	R epi (km)	PGA (m/s ²)	PGV (m/s)
1	AQG	4	5,07	0,36	10	ANT	23	0,26	0,02
2	AQA	5	4,61	0,32	11	CLN	32	0,89	0,07
3	AQV	5	6,46	0,43	12	CSO1	33	0,18	0,02
4	AQM	5	11,47	0,44	13	AVZ	35	0,68	0,11
5	AQK	6	3,65	0,36	14	ORC	49	0,64	0,06
6	GSA	18	1,48	0,1	15	SUL	56	0,34	0,04
7	FMG	19	0,26	0,03	16	CHT	67	0,29	0,08
8	MTR	22	0,62	0,04	17	CDS	88	0,1	0,02
9	GSG	23	0,29	0,03	18	BOJ	133	0,14	0,03

6.3.1 Accelerogrammi

La figura 6.8 riporta le registrazioni dell'accelerazione della stazione AQK; nell'appendice D sono presentati gli accelerogrammi delle altre 4 stazioni appartenenti alla proiezione dell'area di faglia in superficie e della stazione GSA che è la più vicina all'epicentro tra quelle esterne al piano di faglia. In figura 6.14 è riportata l'ubicazione geografica degli accelerogrammi delle quattro stazioni situate nella valle dell'Aterno.

La velocità di propagazione della frattura alla sorgente sismica è grosso modo costante, intorno ai 3 km/s, quindi essendo la lunghezza della faglia di circa 30 km, in questo caso ci si aspetta una durata dell'ordine dei 10 s; negli accelerogrammi si osserva una durata di 12 secondi.

Ai fini della resistenza delle costruzioni meno recenti alle azioni sismiche, come pure della stabilità dei terreni in condizioni dinamiche, la durata del moto, in termini di numero di cicli di ampiezza significativa, è un parametro di importanza critica, potendo innescare fenomeni di fatica a basso numero di cicli e, nei terreni, di accumulo di pressione interstiziale. In quasi tutte le normative per le costruzioni in zona sismica la durata non è esplicitamente quantificata come azione di progetto indipendente, dato che per

contrastarne gli effetti negativi si impiegano per lo più accorgimenti nella progettazione dei dettagli strutturali. Tuttavia, gli effetti devastanti di alcuni grandi terremoti recenti in zona di subduzione sia sulle costruzioni che sui terreni suggeriscono che il problema della durata dovrebbe essere affrontato più esplicitamente.

A differenza dell'accelerazione di picco, l'influenza della magnitudo sulla durata del moto sismico si manifesta con evidenza. Ciò riflette la circostanza che la velocità di propagazione della frattura alla sorgente sismica è grosso modo costante, mentre le dimensioni della sorgente stessa crescono con la magnitudo. La durata del processo di sorgente sarà pertanto diversa, con effetti conseguenti sulla durata del moto sismico in superficie.

Per stabilire la durata dell'intervallo temporale nel quale il moto sismico sia "significativo" dal punto di vista ingegneristico si osserva il tempo che intercorre tra il primo e l'ultimo istante in cui l'accelerazione supera il valore di soglia di 0,05 g.

Per le sei stazioni analizzate in dettaglio nel presente lavoro, la durata "significativa" della scossa è di 8 secondi tranne che per la AQK in cui l'intervallo di superamento del valore di 0,05 g dura 10 secondi.

Per le stazioni AQA, AQV e AQK l'accelerazione di picco orizzontale e verticale sono dello stesso ordine di grandezza, mentre per la stazione AQG l'accelerazione di picco verticale è la metà dell'accelerazione di picco orizzontale. La AQG si trova su suolo roccioso mentre le altre su suolo più soffice, questo è uno degli aspetti che influenza il valore del PGA. Il valore del PGA orizzontale varia in maniera significativa per le stazioni near-fault spostandosi anche solo di pochi chilometri: da 0,33 g (stazione AQK) a 1,16 g (stazione AQM) (tabella 6.4). La stazione GSA presenta un valore di accelerazione di picco nettamente inferiore ai PGA delle altre cinque stazioni, ciò è giustificato dal fatto che la GSA si trova a 18 km dall'epicentro e quindi ad una distanza almeno tripla rispetto alle altre stazioni. Il PGA dell'AQM supera il valore di 1 g in direzione ns.

Le pulsazioni di lungo periodo per le stazioni near-source, possibilmente correlate agli effetti di sito, sono presenti in tutte le registrazioni. Comunque l'effetto del sito è visibile nella registrazione de L'Aquila (AQK) che mostra il maggior contenuto in bassa frequenza e nella registrazione AQA che mostra un alto contenuto in frequenza.

Tabella 6.4. Valori dell'accelerazione di picco nelle tre direzioni nord-sud, est-ovest e verticale

PGA (g)	AQA	AQK	AQG	AQM	AQV	GSA
ns	-0,4383	-0,3604	-0,5149	-1,1663	-0,5610	-0,1452
ew	0,4055	0,3302	-0,4828	-0,8912	0,6757	-0,1518
vt	0,4885	0,3735	0,2731	-1,0607	0,5178	-0,1092

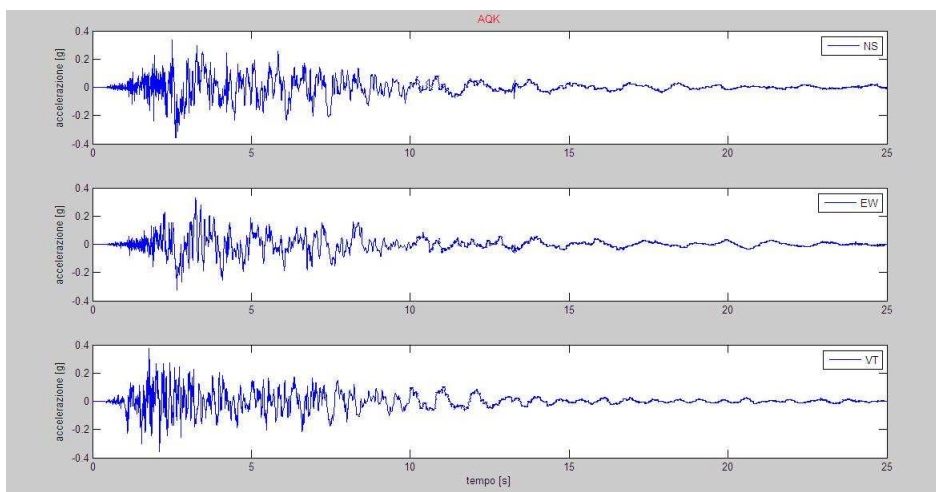


Figura 6.8. Accelerogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQK

6.3.2 Velocigrammi e sismogrammi

Per ricavare l'andamento delle velocità e degli spostamenti nel tempo, si sono integrati gli accelerogrammi applicando la correzione della linea base e filtrando passa alto a 0,4 Hz così da sopprimere la banda di frequenza inferiore a 0,4 Hz. L'errore provocato dalla deriva della linea base dello strumento consiste nella registrazione di valori diversi da 0 anche nel caso in cui ci si trovi in condizioni di quiete. Un errore molto piccolo in termini di accelerazione può provocare errori macroscopici nel calcolo delle velocità e degli spostamenti. Per eliminare i disturbi a bassa frequenza nell'accelerogramma si può correggere la deriva della linea base nel dominio del tempo, oppure si può filtrare passa-alto l'accelerogramma.

In tabella 6.5 e 6.6 sono riportati i valori massimi di velocità e spostamento nelle tre direzioni registrate dalle 6 stazioni analizzate nel presente lavoro. Si noti che anche per le velocità il valore di picco della GSA è al massimo un quarto del PGA delle altre registrazioni considerate.

Nell'appendice D si trovano i velocigrammi e i sismogrammi registrati nelle 5 stazioni sulla faglia e nella GSA.

Per ogni stazione le registrazioni dell'accelerazione, della velocità e dello spostamento iniziano nello stesso istante temporale; solo le stazioni AQK, AQG e AQV sono sincronizzate temporalmente tra di loro.

Sia per le accelerazioni che per le velocità e gli spostamenti si nota un impulso di lunga durata all'inizio del moto; tali pulsazioni, che si presentano spesso in condizioni di near-field e non avvengono talvolta in concomitanza del picco in accelerazione, hanno un forte contenuto energetico. In seguito (paragrafo 6.3.3) vengono analizzate dettagliatamente questi impulsi che potrebbero essere influenzati dalle asperità presenti sul piano di faglia.

Le vibrazioni libere corrispondenti al movimento del terreno in seguito alla scossa sismica sono influenzate dal tipo di suolo: la scossa impone un movimento che segue per alcuni secondi in seguito al termine del rilascio energetico, la durata e la tipologia delle vibrazioni libere dipendono dal tipo di suolo su cui si trova

la stazione. Le vibrazioni si comportano nello stesso modo nelle due direzioni orizzontali (ew e ns); come si può osservare dai velocigrammi le vibrazioni hanno lo stesso periodo nelle due direzioni per ogni singola stazione. In figura 6.9 sono riportate le velocità delle stazioni AQK, AQG e AQV (le tre registrazioni che hanno avuto inizio nello stesso istante temporale), si noti che le vibrazioni libere della AQG durano meno ed hanno una frequenza maggiore, ciò è in accordo col fatto che questa stazione si trova su suolo di tipo A a differenza delle altre due che si trovano su suolo di tipo B.

In figura 6.10 è riportata la localizzazione delle 5 stazioni più prossime all'epicentro coi relativi sismogrammi; si noti la similarità del primo impulso, da attribuire probabilmente all'asperità più vicina, tra tutte le registrazioni rappresentate.

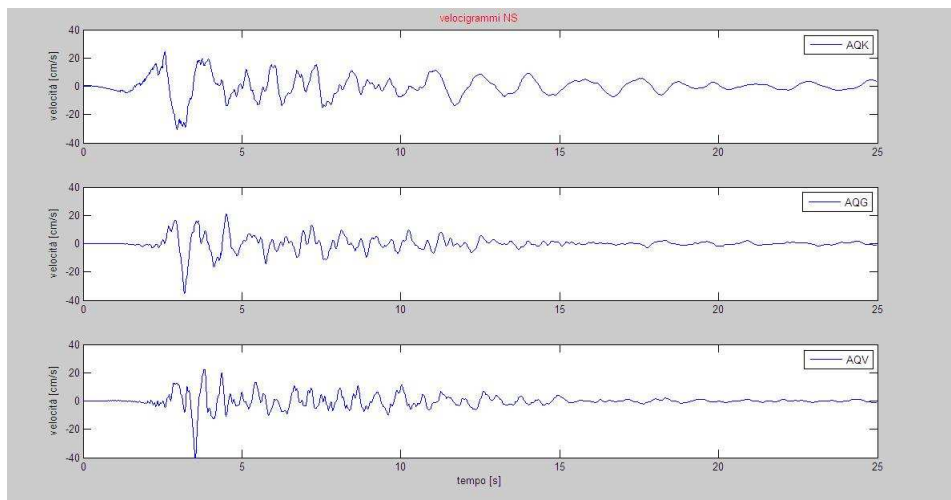


Figura 6.9. Velocigrammi delle stazioni AQK, AQG e AQV

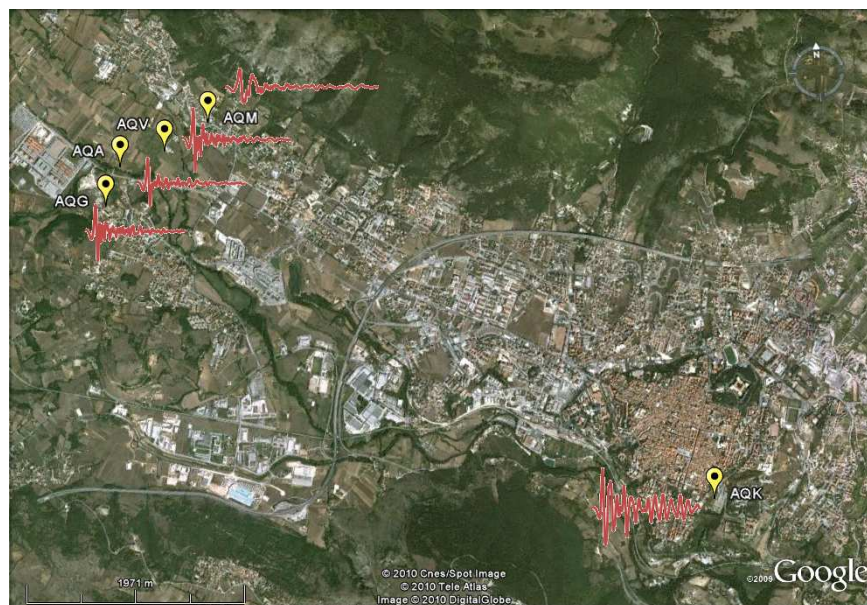


Figura 6.10. Ubicazione delle stazioni AQA, AQG, AQK, AQM e AQV e relativi sismogrammi in direzione ew

Tabella 6.5. Valori della velocità di picco nelle tre direzioni nord-sud, est-ovest e verticale. Dati non corretti

PGV (m/s)	AQA	AQK	AQG	AQM	AQV	GSA
ns	-0,2757	-0,3561	-0,3335	0,436	-0,46	-0,0782
ew	-0,3159	0,3355	0,2894	0,255	-0,408	0,1128
vt	-0,1001	-0,2256	-0,1099	-0,26	0,1138	-0,0424

Tabella 6.6. Valori dello spostamento di picco nelle tre direzioni nord-sud, est-ovest e verticale

PGD (m)	AQA	AQK	AQG	AQM	AQV	GSA
ns	0,0095	0,0737	0,0367	0,0347	0,0282	-0,0101
ew	0,0402	0,0616	-0,0472	0,0284	-0,0509	-0,0126
vt	0,0094	-0,0203	-0,0139	0,0325	0,0141	0,0076

6.3.3 RegISTRAZIONI e asperità

Le asperità corrispondono a rugosità in grado di accumulare tensioni maggiori; durante un terremoto esistono differenti asperità di tutte le dimensioni e forme, che influiscono sugli andamenti di accelerazione registrati nelle varie stazioni. Le asperità potrebbero essere una causa degli impulsi osservati negli accelerogrammi.

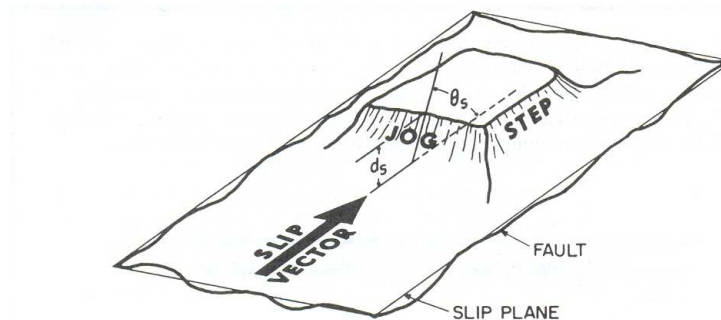


Figura 6.11. Rappresentazione schematica dell'asperità (Scholz, 1990)

In uno studio condotto da Ruiz et al., che verrà pubblicato a gennaio 2011 in *Pure and Applied Geophysics*, viene illustrata l'identificazione e la caratterizzazione degli impulsi propagati dalle asperità dominanti che controllano la rottura per alcuni terremoti, studiando le registrazioni di spostamento integrate dagli accelerogrammi digitali; si definiscono le "asperità dominanti" come le zone dove vengono generate le onde sismiche principali. Nell'articolo vengono illustrati i casi di due terremoti interplacca cileni: Cile centrale 1985 (M_s 7,8) e Tocopilla 2007 (M_w 7,7), specificando che gli impulsi studiati sono simili a quelli osservati nei terremoti continentali superficiali dove gli impulsi possono essere identificati anche direttamente dai dati strong motion (Hall et al. 1995, Makris 1997; e altri).

In figura 6.12 viene riportato un esempio riguardante il terremoto del 3 marzo 1985. A sinistra vi è una delle proiezioni in superficie degli spostamenti permanenti osservati, proposta da Barrientos nel 1988; sono state identificate due zone di maggior spostamento separate da più di 50 km. I diversi studi in generale

mostrano la presenza di almeno due asperità, una vicina all'ipocentro e l'altra circa 50 km più a sud. A destra sono riportati i sismogrammi di San Isidro e San Felipe; si noti l'identificazione di tre impulsi che possono essere osservati anche in altre registrazioni, in dipendenza della distanza dalle asperità dominanti e dalla polarità della sorgente sismica. La differenza di tempo tra l'arrivo degli impulsi indica che questi non sono stati generati nella stessa zona della faglia; per il terremoto del 1985 vi sono state almeno tre zone energetiche. La distanza temporale tra il primo ed il terzo impulso (circa 20 s) rispetta la distanza tra le due asperità identificate da Barrientos (più di 50 km), considerando una velocità di rottura dell'ordine di 3 km/s.

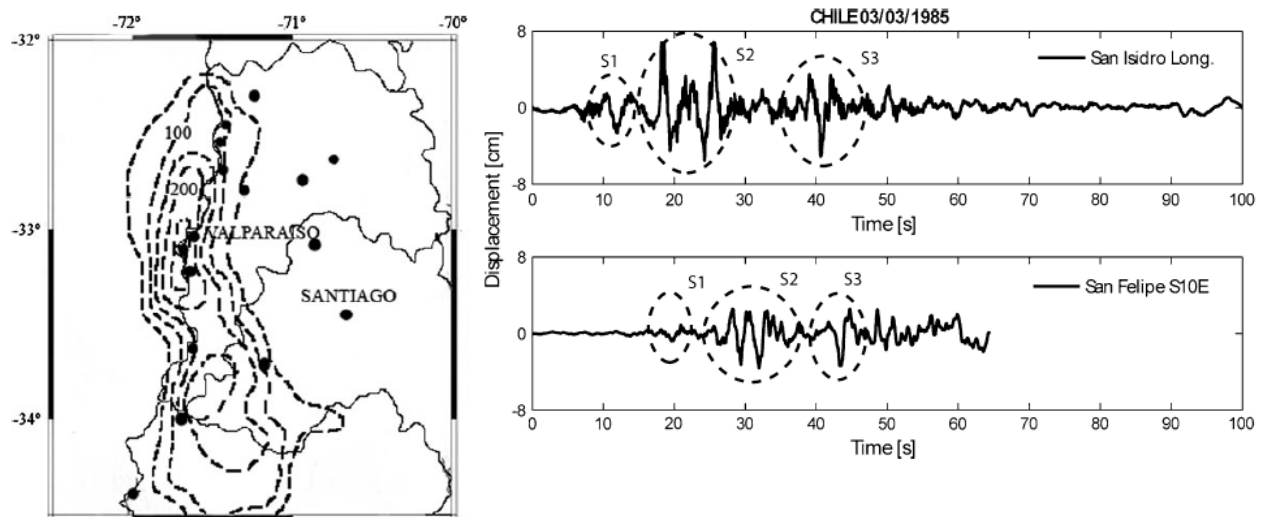


Figura 6.12. Terremoto del Cile centrale 1985. A destra: proiezione in superficie degli spostamenti permanenti osservati; i punti corrispondono alla localizzazione delle stazioni di registrazione (Barrientos 1988), le linee a tratti corrispondono alla proiezione in superficie dello slip del terremoto in cm. A sinistra: sismogrammi di San Isidro e San Felipe per il terremoto del Cile centrale del 1985; gli impulsi identificati sono stati cerchiati, gli impulsi nelle due registrazioni hanno forme simili

E' importante analizzare le registrazioni accelerometriche prestando attenzione al tema delle asperità, argomento importante in quanto può influenzare in maniera diretta la distribuzione dei danni sul territorio, in molti casi si può osservare che l'attenuazione delle onde non è correlata con le distanze ipocentrale o epicentrale o dalla distanza dalla faglia, come viene generalmente considerato nelle formule empiriche; queste formule dovrebbero considerare la localizzazione e la relativa magnitudo di ogni asperità dominante e la tipologia di rottura (Ruiz et al., 2010).

Di seguito viene trattato il tema delle asperità osservando la distribuzione dello spostamento del terreno e la localizzazione degli epicentri delle repliche (figura 6.13) e i valori di picco dell'accelerazione delle 4 stazioni posizionate nella valle dell'Aterno; inoltre si affronta questo argomento cercando di individuare gli impulsi influenzati dalla presenza delle rugosità sul piano di faglia, secondo le osservazioni lette nell'articolo di Ruiz et al. nominato in precedenza.

In figura 6.13 viene riportata la rappresentazione dello scorrimento sismico (spostamento relativo) lungo il piano di faglia (versione di Cirella et al., 2009); la zona in rosso e le zone gialle sono quelle che hanno presentato uno spostamento maggiore, sembrerebbe dunque che nel caso del terremoto de L'Aquila del 2009 sul piano di faglia si siano manifestate due asperità dominanti ed altre secondarie. Preme sottolineare che vi sono diverse modellazioni riguardanti la rappresentazione dello spostamento permanente in seguito al terremoto dell'aquilano, tuttavia non è possibile decidere quale sia la più affidabile.

Il punto di incontro tra le due rette tracciate in rosso corrisponde all'ubicazione delle stazioni AQA, AQG, AQM e AQV che, per quanto osservato nel paragrafo 2.6 (in cui si propone l'ubicazione dell'asperità più a nord in corrispondenza dell'area che racchiude il maggior numero di epicentri delle repliche e non dell'area in cui si è registrato lo spostamento maggiore), si potrebbero trovare sull'asperità più a nord. Seguendo questo ragionamento risulterebbe che le 4 stazioni in esame teoricamente si trovano sull'asperità. Osservando gli accelerogrammi di queste 4 stazioni si potrebbe argomentare ulteriormente questa supposizione (figura 6.14). L'immagine in figura 6.13 è stata prodotta con degli strumenti telesismici quindi l'errore in termine di ubicazione delle zone che hanno subito lo spostamento maggiore è dell'ordine di 3-5 km, mentre l'ubicazione delle repliche è molto più precisa.

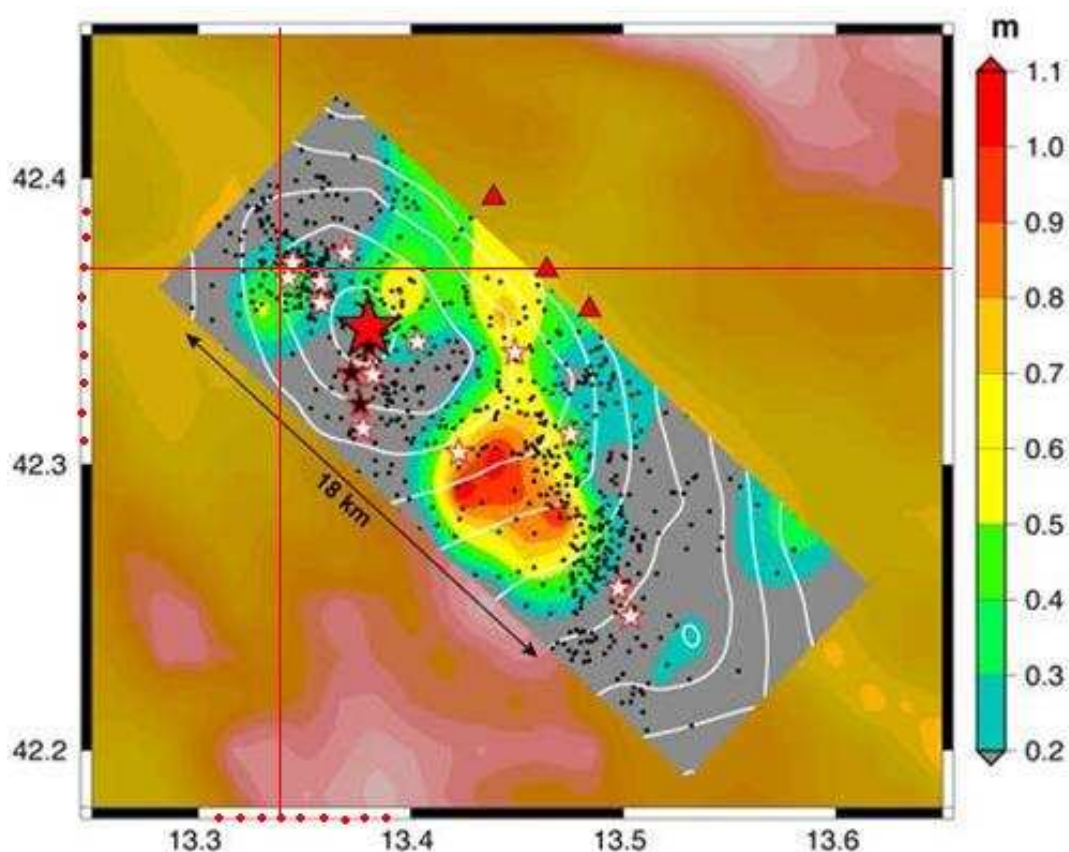


Figura 6.13. Distribuzione dello scorrimento sismico indicato coi diversi colori ed individuazione del piano di faglia (Cirella et al. 2009). L'incrocio delle due rette in rosso rappresenta la locazione delle stazioni AQA, AQG, AQM e AQV. Le linee bianche rappresentano la posizione della propagazione della rottura in un intervallo di 1 s. La stella rossa corrisponde alla posizione dell'epicentro della scossa principale e le altre stelle gli epicentri delle repliche più importanti, mentre i punti in nero corrispondono agli epicentri delle altre repliche registrate

Generalmente si hanno valori di accelerazione maggiori nei punti in corrispondenza delle rugosità. Osservando i valori dei PGA in direzione verticale per le 4 stazioni della valle dell'Aterno, si nota che i valori dell'accelerazione di picco decrescono spostandosi dalla stazione AQM (che si è deciso di considerare nonostante sia stato osservato un mal funzionamento) alla AQV (figura 6.14). Si potrebbe supporre che la stazione AQM si trova in corrispondenza dell'asperità più a nord e le stazioni AQV, AQA e AQG si trovano man mano più lontane dal punto dell'asperità; infatti i valori dei PGA vanno da 1,060 g (stazione AQM) a 0,273 g (stazione AQG) passando da un PGA= 0,518 g (stazione AQV) e 0,489 g (stazione AQA). In figura 6.14 è illustrata una visualizzazione grafica degli accelerogrammi che mette in evidenza il decrescere del valore dell'accelerazione di picco passando dalla registrazione in AQM alla registrazione in AQG.

Il terremoto de L'Aquila, oltre ad essere stato registrato da ben 5 strumenti posti sulla proiezione di faglia in superficie, è dunque probabilmente caratterizzato dal fatto che 4 di queste 5 stazioni si trovano in corrispondenza di un'asperità.



Figura 6.14. Ubicazione delle stazioni AQA, AQG, AQM e AQV, relativi accelerogrammi e valori dei PGA in direzione vt (PGAaqm=1,060g; PGAaqv=0,518g; PGAaqa=0,489g; PGAaqg=0,273g)

In figura 4.5 (capitolo 4) è rappresentata la distribuzione dell'intensità macrosismica (gruppo QUEST); il punto di incontro tra le due rette rosse corrisponde all'ubicazione delle 4 stazioni che si suppone si trovino in corrispondenza dell'asperità (AQA, AQG, AQM e AQV). Si nota che le zone maggiormente danneggiate si trovano in direzione sud-est rispetto all'asperità più a nord, dove sono ubicate le quattro stazioni di registrazione.

E' già stata ampiamente commentata la distribuzione dei danni in direzione SE: questa distribuzione direzionale dei danni probabilmente riflette una combinazione tra la direttività della rottura e gli effetti sismici di amplificazione litostratigrafica. Inoltre il contributo delle due asperità nell'identificazione delle

zone danneggiate potrebbero essere significativo in termini di combinazione dell'energia rilasciata dalle due zone di rugosità.

Seguendo l'analisi studiata da Ruiz et al. (2010) si vuole osservare se le stesse caratteristiche possono riguardare il caso de L'Aquila. Si premette che anche in presenza di impulsi negli accelerogrammi italiani, non si può affermare con certezza che questi siano causati dalle asperità, in quanto le faglie dei terremoti cileni e quella de L'Aquila hanno dimensioni enormemente differenti, quindi per il Cile si può parlare di eventi e sottoeventi durante la stessa scossa della durata superiore ai 120 secondi, mentre nel caso de L'Aquila la faglia si rompe quasi contemporaneamente in tutti i punti (durata dell'intera scossa: 12 s).

Si è scelto di sovrapporre le pulsazioni degli spostamenti delle stazioni AQG, AQV e AQV poiché sono le uniche tre sincronizzate temporalmente; nella figura 6.15 si analizza la componente orizzontale in direzione EW, si osserva che gli impulsi principali coincidono: si presentano nello stesso istante e hanno la stessa durata, ciò potrebbe essere causato dal fatto che queste stazioni si trovano sull'asperità od in prossimità.

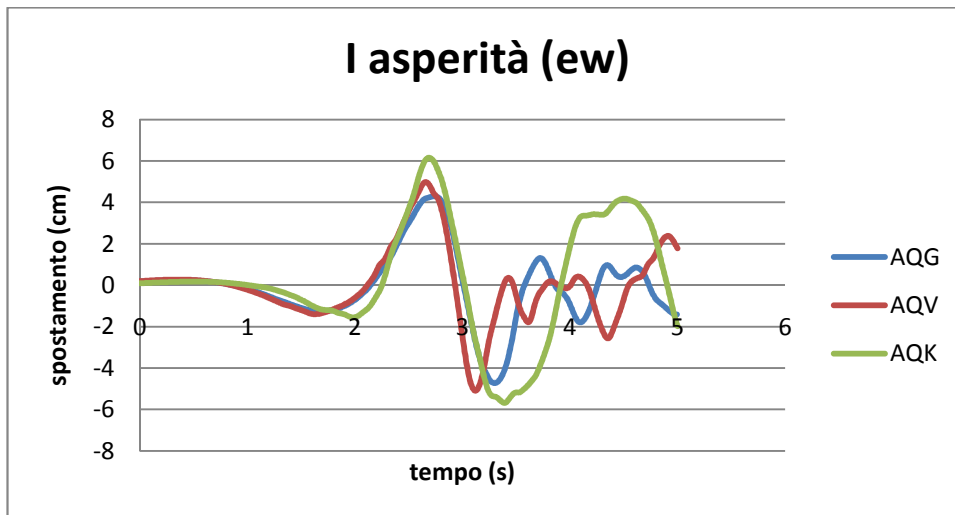


Figura 6.15. Sovrapposizione del primo impulso dello spostamento per le stazioni AQG, AQV e AQK in direzione ew

In figura 6.16 è riportato il primo impulso dello spostamento in direzione ew per le 6 stazioni analizzate in precedenza (AQG, AQV, AQK, AQA, AQM e GSA); per una rappresentazione chiara si è scelto di sovrapporre i grafici ponendo allo stesso istante il valore di picco, così da poter osservare la coerenza nella forma dell'impulso di spostamento.

Si nota che tutte stazioni presentano un impulso dello stesso periodo, della durata di 1 secondo, ciò potrebbe significare che l'asperità abbia un diametro approssimativamente di 3 km; bisogna però considerare che ciò non viene determinato solo dall'asperità. Dato che gli impulsi coincidono potrebbe significare che le stazioni si trovano sull'asperità o vicine.

La stazione GSA ha registrato un valore di picco in corrispondenza dell'impulso assai minore rispetto alle altre stazioni, ciò dovrebbe essere spiegato dal fatto che la stazione si trova nettamente più distante delle altre dalla prima asperità.

La stazione AQG è l'unica su roccia, si noti che ha un comportamento coerente con le altre, ciò significa che in questa osservazione non si presenta l'influenza del suolo, aspetto presente negli accelerogrammi in cui i valori delle registrazioni della AQG sono nettamente inferiori rispetto alle altre stazioni.

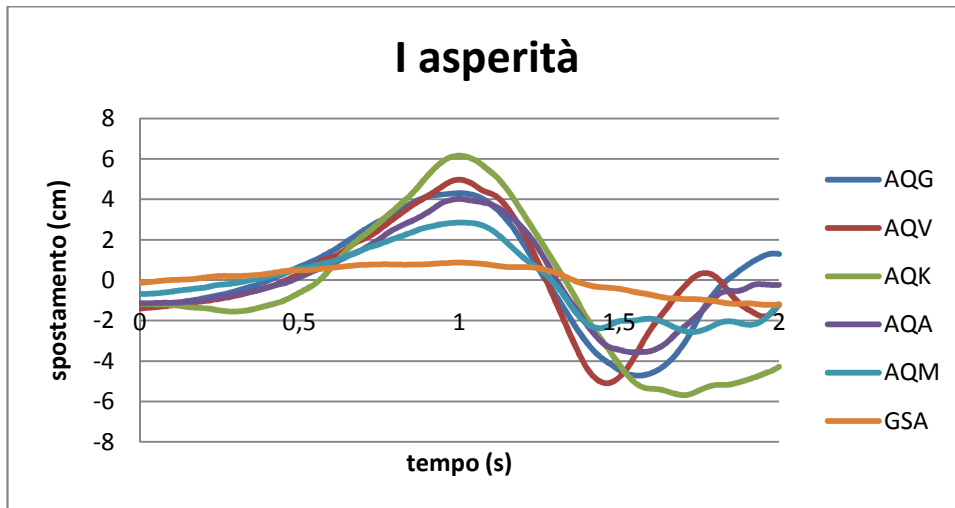


Figura 6.16. Impulso (in direzione ew) rappresentativa della prima asperità per le 6 stazioni in analisi

In figura 6.17, è riportata la sovrapposizione della registrazione accelerometrica (in g) e dello spostamento (indicati in decimetri e non in metri per poter essere più evidente il sismogramma posto sopra l'accelerogramma) per la stazione AQA in direzione ew, con lo scopo di osservare in che parte dell'accelerogramma si presentano gli impulsi in spostamento; si nota facilmente che la prima pulsazione dello spostamento coincide con la prima dell'accelerazione, ciò potrebbe indicare che la parte dell'accelerogramma compresa nel gap temporale tra i 2 secondi e i 3,5 secondi riguarda la prima asperità.

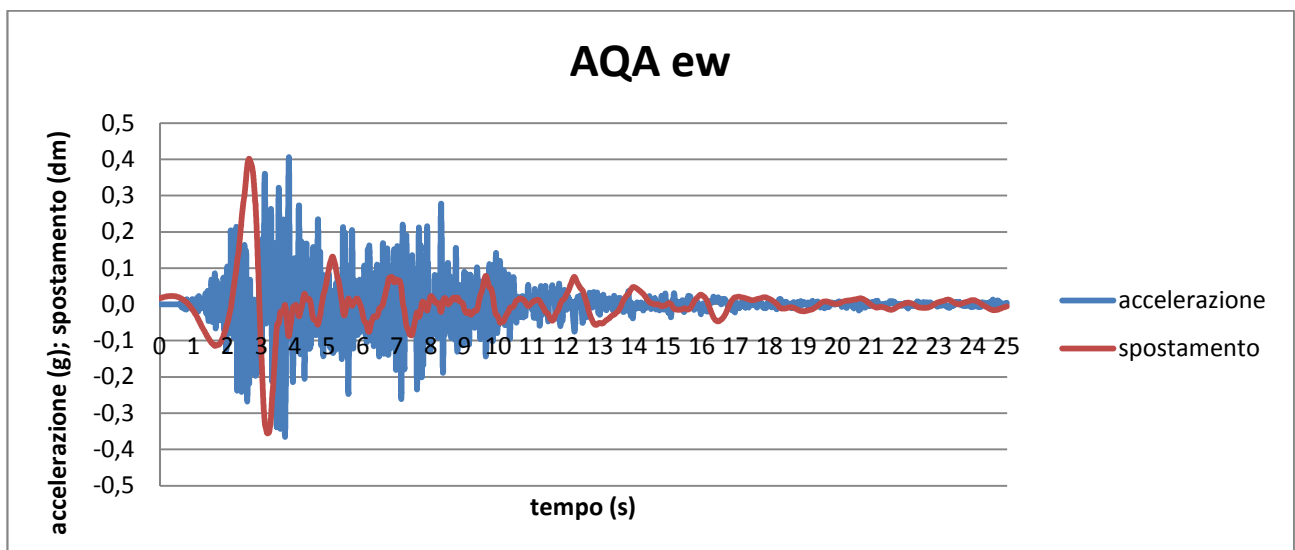


Figura 6.17. Accelerogramma e sismogramma in direzione ew stazione AQA

E' impossibile identificare l'impulso teoricamente corrispondente alla seconda asperità in quanto subentra la sovrapposizione con altre onde diversamente dal primo impulso che da quanto visto non subisce disturbi per le stazioni AQA, AQK, AQG, AQM e AQV.

In figura 6.18 sono illustrati gli impulsi delle 5 stazioni più prossime all'epicentro probabilmente influenzati dalla prima asperità. Si noti la somiglianza di comportamento nei distinti casi, ciò permette di concludere che l'impulso è indipendente dal tipo di suolo.

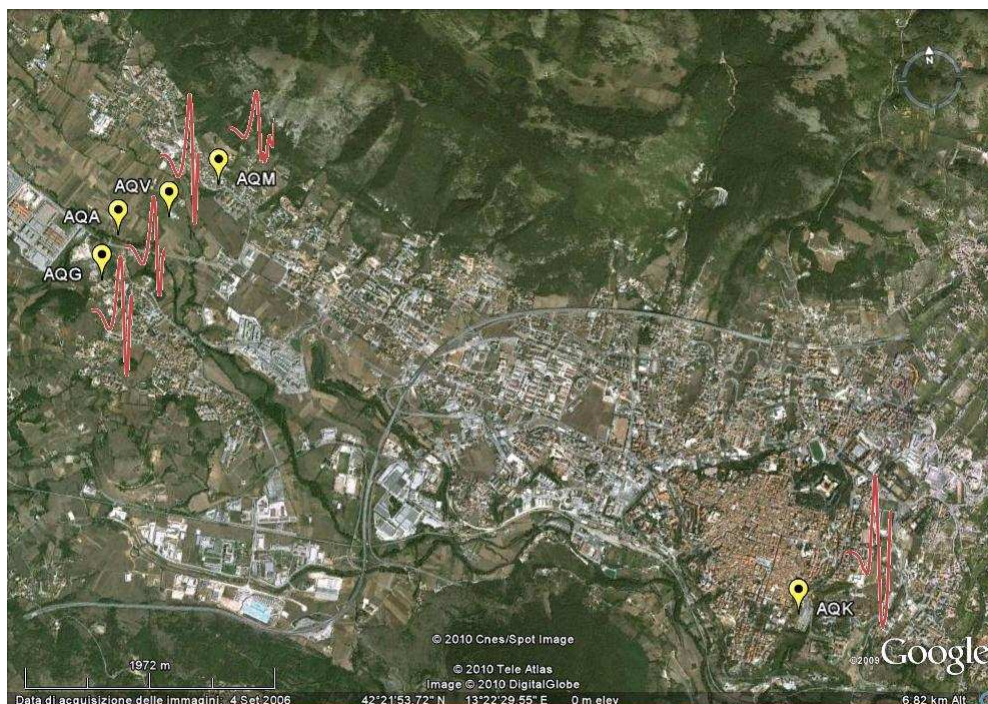


Figura 6.18. Rappresentazione dell'impulso probabilmente causato dalla prima asperità nelle 5 stazioni più prossime all'epicentro

In conclusione di questa parte riguardante l'analisi dell'influenza delle asperità sulle registrazioni strumentali, preme sottolineare che si è notata una certa coerenza tra il discorso presente nell'articolo di Ruiz et al. (2010) e quanto osservato nel caso de L'Aquila; nonostante ciò si fa presente che vi sono dei possibili limiti dettati dalla diversità tra le faglie cilene e quelle italiane, soprattutto in termini di dimensioni. L'impulso individuato nelle registrazioni de L'Aquila potrebbe anche essere dovuto ad un effetto di direttività o di near field.

6.4 Relazioni di attenuazione

Nelle applicazioni dell'ingegneria sismica è spesso necessario definire la severità di un terremoto in un sito tramite pochi parametri rappresentativi del moto del suolo, direttamente impiegabili ai fini del progetto di opere o per valutazioni del rischio.

Si usano a tale scopo espressioni empiriche, dette relazioni di attenuazione, che descrivono appunto, in forma molto semplificata, come si attenua il moto del suolo dalla sorgente sismica al sito. Esse impiegano

un'unica grandezza descrittiva dell'intensità del terremoto alla sorgente (magnitudo), ed un'unica grandezza per mettere in conto gli effetti legati alla propagazione delle onde sismiche dalla sorgente al sito (una misura della distanza) (Faccioli e Paolucci, 2005).

Le relazioni di attenuazione disponibili in letteratura sono numerose ed in crescita continua; la loro attendibilità dipende molto dai criteri di formazione del campione di dati su cui viene poi eseguita la regressione. In generale le varie relazioni di attenuazione si differenziano tra di loro per quanto riguarda la distanza sorgente-sito considerata, la scala della magnitudo, il tipo di faglia e le condizioni di sito. La figura 6.19 illustra le diverse distanze sorgente-sito che possono essere considerate per lo studio del fenomeno di attenuazione, in particolare è stata evidenziata la distanza di Joyner e Boore che è la minima distanza orizzontale con la proiezione in superficie della rottura di faglia.

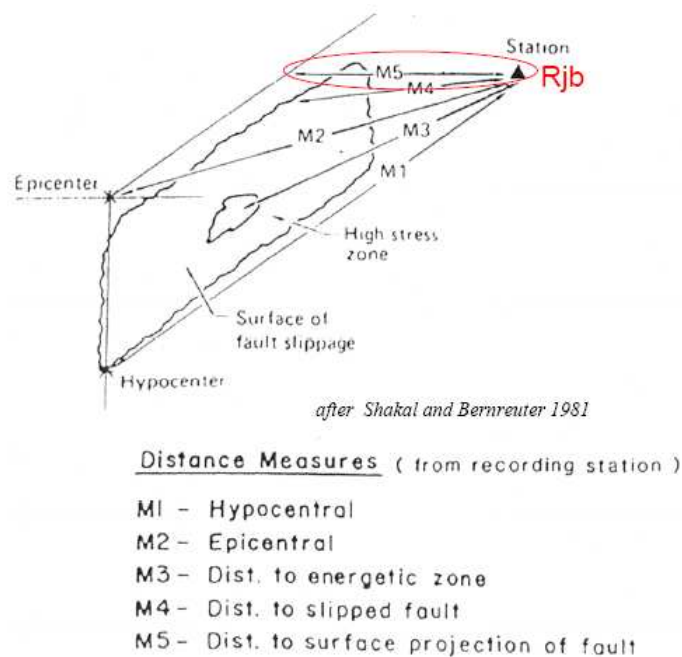


Figura 6.19. Distanze sorgente-sito considerate nelle diverse relazioni di attenuazione

Le varie relazioni di attenuazione si basano su basi di dati differenti, ad esempio la relazione di Sabetta e Pugliese (1996) ha utilizzato un database comprendente esclusivamente terremoti italiani, Atkinson e Boore (2003) include Giappone, Messico e America Centrale, Boore e Atkinson (2008) utilizza dati a livello mondiale, Akkar e Bommer (2007) comprende l'Eurasia, Cauzzi e Faccioli (2008) dati mondiali, la maggior parte giapponesi e Bozorgnia e Campbell (2004) dati mondiali near source.

La formulazione classica (Sabetta e Pugliese, 1987) è la seguente:

$$\log(Sa(T)) = a + bM + c \log \sqrt{R^2 + h^2} + e_1 s_1 + e_2 s_2 \pm \sigma_{\log Sa} \quad \text{eq. 6.1}$$

Dove $Sa(T)$: ordinate spettrali a diversi periodi strutturali T ;

M : magnitudo momento;

R : distanza sito-sorgente: epicentrale o distanza R_{jb} ;

s_1, s_2 : coefficienti di sito.

In questo studio si è scelto di confrontare i dati del terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009 con gli andamenti della relazione di attenuazione di Akkar e Bommer (2007) che si basa su terremoti avvenuti in Europa e Medio Oriente.

La forma generale dell'equazione di Akkar e Bommer è:

$$\log(PGX) = b_1 + b_2M + b_3M^2 + (b_4 + b_5M)\log\sqrt{R_{jb}^2 + b_6^2} + b_7S_S + b_8S_A + b_9F_N + b_{10}F_R \quad \text{eq. 6.2}$$

Nel caso specifico in cui si vuole considerare l'accelerazione di picco (PGA) la formula risulta essere:

$$\log(PGA) = 1,647 + 0,767M - 0,074M^2 + (-3,162 + 0,321M)\log\sqrt{R_{jb}^2 + 7,682^2} + 0,105S_S + 0,020S_A - 0,045F_N + 0,085F_R \quad \text{eq. 6.3}$$

Dove M è la magnitudo momento; S_A e S_S sono variabili che rappresentano l'influenza della classe del sito, possono valere 1 per siti di suolo duro e morbido rispettivamente e zero negli altri casi; F_N e F_R sono variabili riguardanti la tipologia di faglia, hanno valori pari a 1 per rotture normali e inverse rispettivamente, e zero negli altri casi.

Essenzialmente la base di dati usata in questo studio è circa la stessa di quella utilizzata da Ambraseys et al. (2005) per derivare le equazioni per la predizione del PGA. Un'importante differenza rispetto alla base di dati di Ambraseys et al. (2005) riguarda la classificazione rispetto al tipo di faglia. Le registrazioni sono distribuite rispetto alle rotture inverse, normali e trascorrenti in proporzione di circa 1:2:2 (tabella 6.7).

Le stazioni di registrazione sono state classificate a seconda del valore medio della velocità delle onde di taglio nei primi 30 m del sito ($V_{s,30}$), quelle aventi valori sopra 750 m/s sono state classificate come roccia e quelle con valori inferiori a 360 m/s come suolo morbido; quelle aventi valori intermedi sono ritenute aventi suolo duro.

La magnitudo considerata è M_w , la distanza è quella di Joyner e Boore (R_{jb}); in condizioni come quella de L'Aquila, che rappresenta la prima volta in Italia di abbondanza di elevati valori del PGA in near-field, è più appropriato usare questa distanza che è la minima distanza orizzontale con la proiezione in superficie della rottura di faglia.

La base di dati contiene un totale di 532 accelerogrammi di 131 terremoti aventi magnitudo momento compresa tra 5,0 e 7,6.

Prestando attenzione alla base di dati utilizzata per la formulazione di questa espressione (figura 6.20), risulta ragionevole che le equazioni derivate dalla analisi di regressione di queste registrazioni risultano valide per distanze tra i 5 e 100 km e per eventi aventi M_w tra 5 e 7,6. La scarsità di registrazioni near-fault è chiaramente una carenza di questa base di dati, è per questo che si vuole cercare di migliorare tale formulazione prendendo in considerazione il terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009, così da aggiungere alla base di dati valori di registrazioni al di sotto dei 5 km.

Tra i dati presi in considerazione solo una delle registrazioni ottenute ad una distanza sotto i 5 km proviene da un evento italiano, si tratta del terremoto del Lazio-Abruzzo dell' 11 maggio 1984.

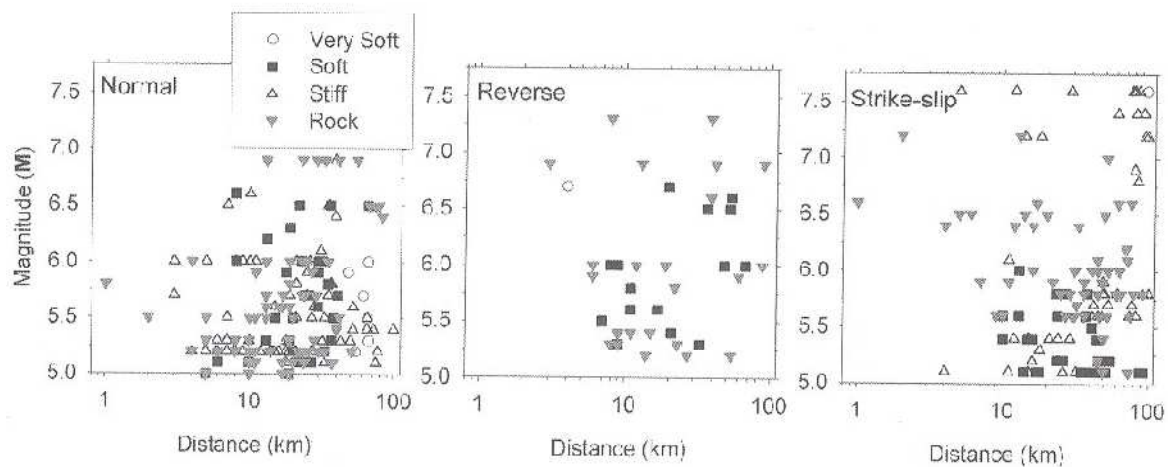


Figura 6.20. Distribuzione dei dati rispetto alla magnitudo, distanza, classificazione del sito e tipo di faglia

Tabella 6.7. Statistica degli eventi in termini di magnitudo e classi di sito

Site Class	NEURP	Normal	Reverse	Strike-Slip	Total
Rock	A & B	80	26	68	174 (33%)
Stiff	C	86	52	82	220 (41%)
Soft	D	37	17	75	129 (24%)
Very soft	E	7	1	1	9 (2%)
Total		210 (39,5%)	96 (18%)	226 (42,5%)	

I dati riguardanti la scossa principale sono stati registrati ad una distanza epicentrale compresa tra 4 e 297 km ed ad una distanza di Joyner-Boore (R_{jb}) compresa tra 0 e 284 km (in seguito verrà assegnata, per ragioni grafiche, una distanza pari a 0,1 km ai siti aventi formalmente distanza $R_{jb}=0$). In particolare, si sono ottenute 23 registrazioni ad una distanza inferiore ai 50 km. Nella figura 6.21 è indicata la geometria della faglia ipotizzata tenendo in considerazione diverse informazioni come la geologia, la distribuzione delle repliche e le osservazioni geodetiche; basandosi su tale proiezione si sono calcolate le R_{jb} .

Nella tabella 6.8 sono elencati i valori delle distanze R_{jb} e del valore di picco dell'accelerazione orizzontale massima per ogni stazione di registrazione (ITACA). Il valore massimo osservato di PGA è 1143,17 cm/s^2 registrato alla stazione L'Aquila-V.Aterno-Il Moro (AQM), ma in generale tutti i valori del PGA near fault sono maggiori di 350 cm/s^2 .

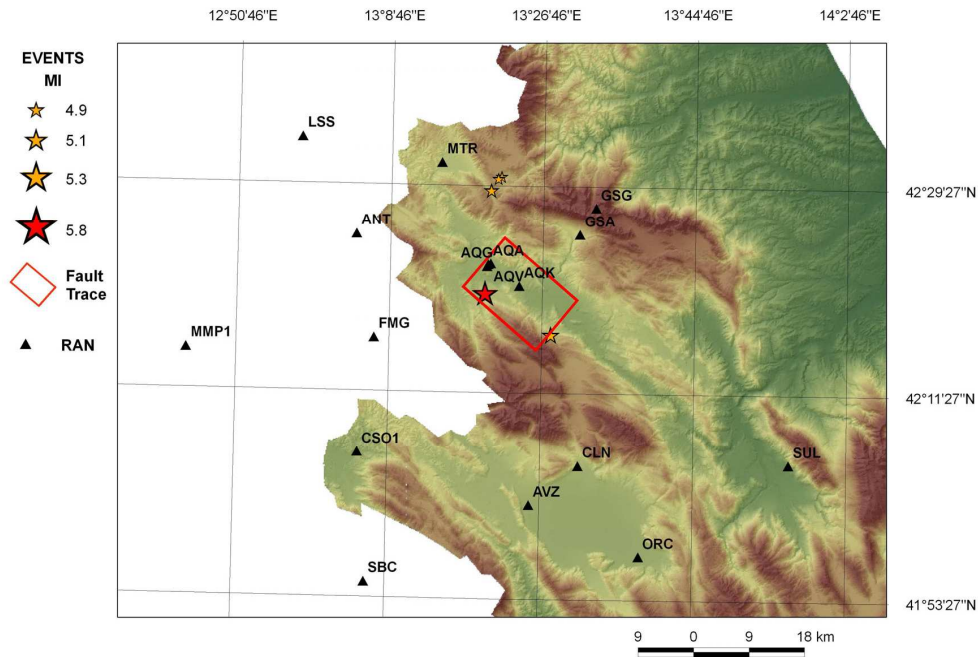


Figura 6.21. Geometria della faglia tracciata rispetto agli eventi principali. I triangoli mostrano le stazioni sismiche della RAN installate nell'area epicentrale

Tabella 6.8. Accelerazione di picco e R_{jb} di ogni stazione della RAN

stazione	R_{jb} (km)	PGA (cm/s ²)	stazione	R_{jb} (km)	PGA (cm/s ²)	stazione	R_{jb} (km)	PGA (cm/s ²)
ANT	19,3	25,97	CNM	153,1	1,88	RIC	144,1	2,54
AQA	0,1	429,534	CSO1	31,7	18,326	SBC	46,6	6,64
AQG	0,1	504,504	CSS	91,1	9,44	SCM	139,2	4,32
AQK	0,1	353,094	CTL	178,8	4,37	SCP	147,8	5,65
AQM	0,1	1143,17	FMG	16,6	26,362	SDG	195,6	1,33
AQV	0,1	662,088	FOR	225,6	1,58	SEP	137,1	3,67
ASS	96,5	6,04	GNL	266,5	2,19	SNM	184,7	2,29
AVL	185,7	1,25	GSA	8,6	148,764	SNS	284,9	3,82
AVZ	25,1	67,62	GSG	13,7	29,106	SPC	63,2	7,55
BBN	194,5	1	ISR	97,3	7,21	SPO	62,6	9,57
BDT	172,8	1,99	LSS	35,6	9,64	SSR	169	5,33
BNE	167,9	2,06	MMP1	45,9	8,83	STL	277	0,94
BOJ	121,1	14,21	MNN	212,4	2,38	STN	195,6	1,32
CAN	217,6	1,86	MTR	15,9	62,23	SUL	43,4	33,614
CDS	76,2	9,996	NAP	173,1	2,65	TLS	146,2	2,59
CHT	52,2	29,4	ORC	37,3	64,386	TMO	126	9,84
CLN	20	89,278	PDM	127,1	1,54	VIE	224,2	2,21
CMB	126,5	2,88	PIC	143	1,24	VRP	117,5	3,53
CMR	112,9	5,34	PTF	120,4	6,86			

In figura 6.22 è riportato il confronto tra i dati registrati durante la scossa principale del 6 aprile 2009 e l'andamento della relazione di attenuazione formulata da Akkar-Bommer. E' facile osservare che quanto detto in precedenza è stato confermato: i dati seguono più coerentemente la relazione generale per una distanza compresa tra i 5 e i 100 km di distanza, quindi tale relazione non è adatta per descrivere un fenomeno near-source o un fenomeno registrato a lunga distanza. In generale i dati near-source sono sottostimati e le registrazioni ottenute ad una distanza maggiore di 100 km sono sovrastimate.

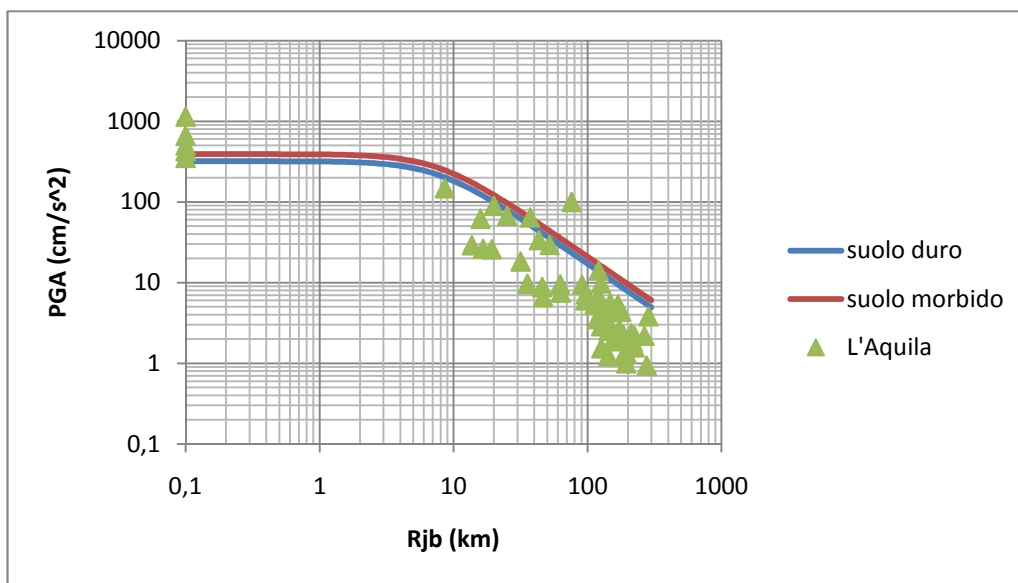


Figura 6.22. Confronto tra i dati della scossa principale del terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009 e la relazione di attenuazione Akkar-Bommer

Questa parte dello studio conferma l'importanza del terremoto del 6 aprile 2009 avvenuto a L'Aquila in quanto è stato ampiamente registrato anche da stazioni molto prossime alla sorgente. Come per tutti i terremoti superficiali, bisogna dare importanza all'effetto near-source, di conseguenza risulta molto importante avere stazioni vicine alla faglia.

Alla luce di quanto osservato si può concludere che il terremoto del 6 aprile 2009 e le successive repliche, hanno generato la più grande e completa mole di dati sperimentali della storia sismica d'Italia inoltre le relazioni di attenuazione disponibili in letteratura sottostimano i valori di PGA a breve distanza e sovrastimano quelli a grande distanza poiché non sono numerosi gli eventi registrati a breve distanza dall'epicentro come nel caso del terremoto de L'Aquila.

Bisogna inoltre considerare che le stazioni più prossime all'epicentro nel caso aquilano si trovano sull'asperità più grande quindi in quei siti si verifica un'accelerazione di picco maggiore; l'aspetto delle asperità non viene preso in considerazione nelle relazioni di attenuazione e conseguentemente si possono osservare dei valori di accelerazione più alti di quelli previsti e quindi anche un livello di danno maggiore.

6.5 Spettri di risposta

Gli spettri di risposta sono curve che rappresentano il luogo dei massimi della risposta dell'oscillatore (che è l'approssimazione della struttura in esame) al variare di ω_n e ξ ; dove ω_n è la pulsazione naturale dell'oscillatore e ξ è il fattore di smorzamento. Generalmente vengono costruite in funzione del periodo naturale T_n dell'oscillatore, per un assegnato valore di ξ . Il massimo della risposta è calcolato in termini di spostamento relativo, velocità relativa o accelerazione assoluta.

Le figure 6.23, 6.24 e 6.25 mostrano gli spettri di risposta in accelerazione relativi alla scossa principale per le cinque stazioni più prossime all'epicentro, rispettivamente per la direzione est-ovest, nord-sud e verticale. Questi sono spettri elastici con coefficiente di smorzamento ξ del 5%.

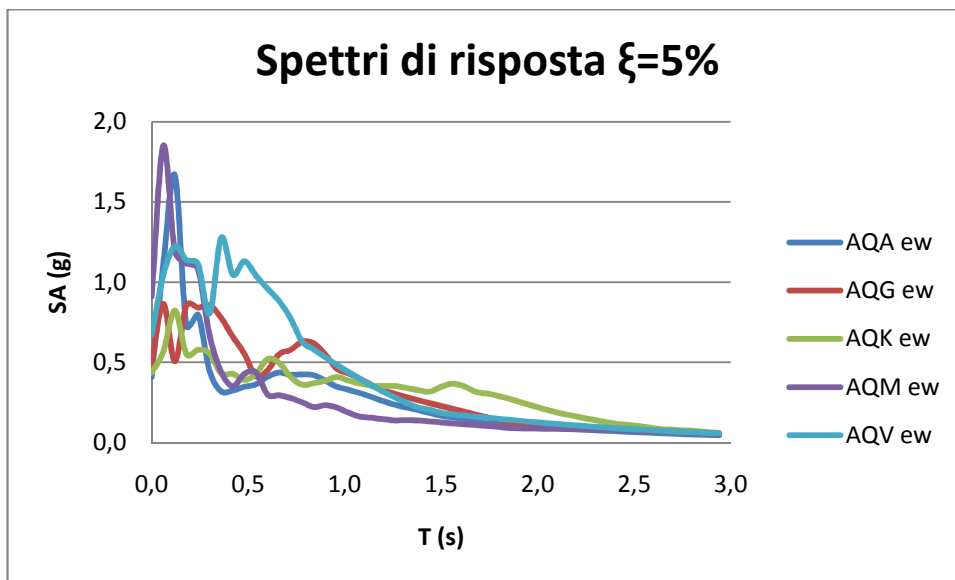


Figura 6.23. Spettri di risposta delle cinque stazioni più prossime all'epicentro (direzione ew)

Tabella 6.9. Valore dell'accelerazione spettrale massima per ogni registrazione considerata (direzione ew)

registrazione	AQA ew	AQG ew	AQK ew	AQM ew	AQV ew
acc max (g)	1,6673	0,86416	0,82386	1,8507	1,2772
T (s)	0,12	0,06	0,12	0,06	0,36

Si osserva che il valore maggiore di accelerazione pari a 1,85 g viene raggiunto dalla stazione AQM per un periodo di 0,06 secondi, subito seguita dalla stazione AQA che raggiunge il massimo di 1,67 g per $T=0,12$ s.

In generale gli spettri hanno due picchi: solitamente uno in corrispondenza del periodo dell'impulso dalla faglia (la pulsazione dalla sorgente) e l'altro del periodo del suolo. Dalla figura 6.23 si notano chiaramente i due picchi della registrazione AQM, così come quelli delle altre stazioni. Nella tabella 6.10 sono riportati i valori dei periodi dell'impulso dalla faglia (T_f) e dei periodi del suolo (T_s); si noti che le stazioni AQA e AQK

presentano lo stesso valore di T_f , ciò significa che probabilmente hanno le stesse caratteristiche nei confronti della faglia, così come AQG e AQM.

Preme sottolineare che un altro fattore che influenza la forma e l'andamento degli spettri di risposta è la presenza delle asperità sulla superficie di faglia oltre alle caratteristiche del terreno dove si trova la stazione di registrazione; per questo un'altra ipotesi può essere che i due picchi siano dovuti alla presenza delle due asperità e quindi non rappresentano il T_f e il T_s .

Tabella 6.10. Valori dei periodi dell'impulso dalla faglia (T_f) e dei periodi del suolo (T_s) per le cinque stazioni più prossime all'epicentro

stazione	AQA	AQG	AQK	AQM	AQV
T_f	0,12	0,06	0,12	0,06	0,36
T_s	0,66	0,78	0,60	0,48	0,48

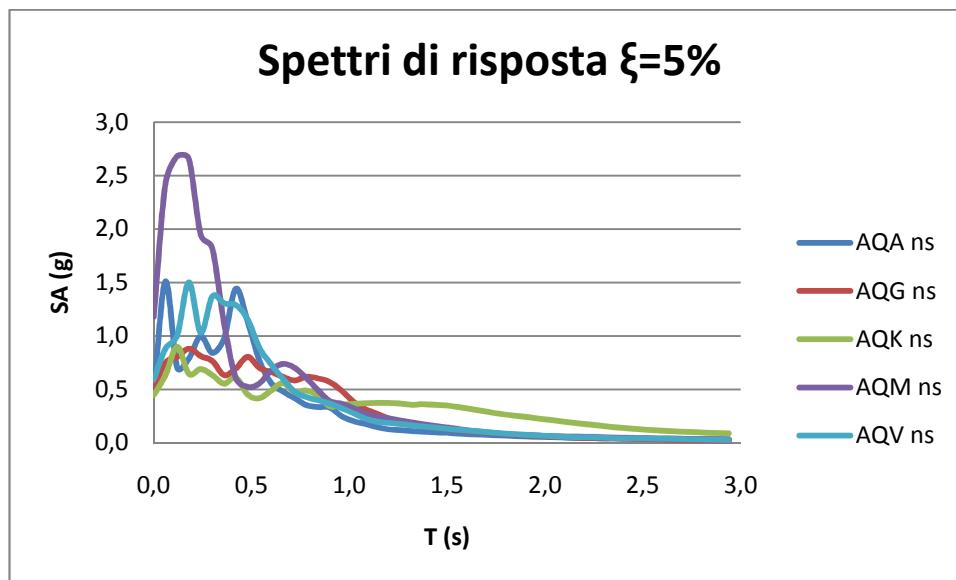


Figura 6.24. Spettri di risposta delle cinque stazioni più prossime all'epicentro (direzione ns)

In questa'altra direzione si presenta un valore di picco per la stazione AQM che si discosta nettamente dalle altre. Anche in questo caso le stazioni AQG ed AQK sono quelle che porterebbero ad un'accelerazione minore delle strutture con $T_n < 0,3$ s.

Tabella 6.11. Valore dell'accelerazione spettrale massima per ogni registrazione considerata (direzione ns)

registrazione	AQA ns	AQG ns	AQK ns	AQM ns	AQV ns
acc max (g)	1,5095	0,87913	0,89731	2,6811	1,5011
T (s)	0,06	0,18	0,12	0,12	0,18

Anche in questa direzione il valore massimo di accelerazione viene raggiunto dalla stazione AQM, pari a 2,68 g per un periodo T di 0,12 s, seguito dai valori delle stazioni AQA e AQV che mostrano la massima accelerazione della struttura per un periodo naturale di vibrazione rispettivamente di 0,06 s e 0,18 s.

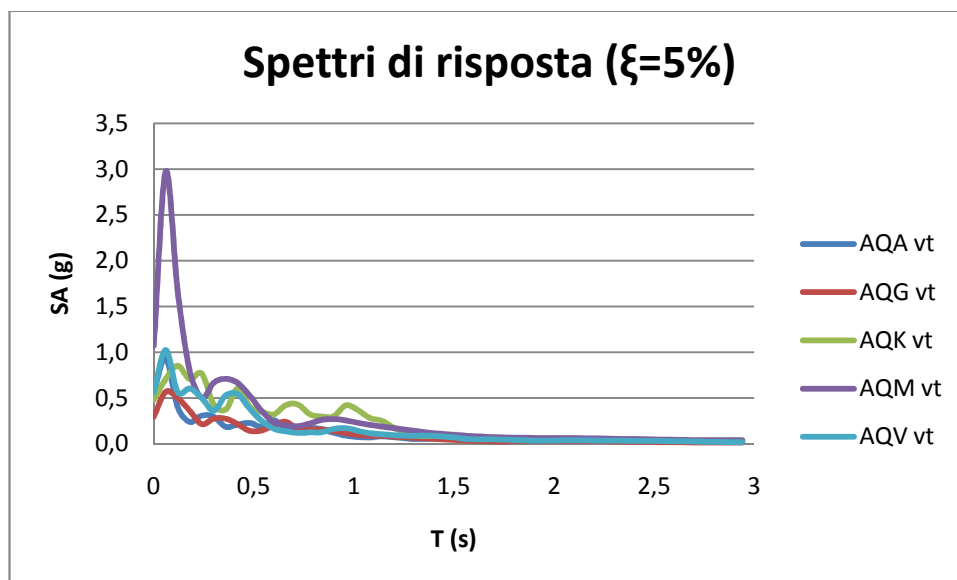


Figura 6.25. Spettri di risposta delle cinque stazioni più prossime all'epicentro (direzione vt)

Tabella 6.12. Valore dell'accelerazione spettrale massima per ogni registrazione considerata (direzione vt)

registrazione	AQA vt	AQG vt	AQK vt	AQM vt	AQV vt
acc max (g)	0,94	0,57	0,85	2,97	1,02
T (s)	0,06	0,06	0,12	0,06	0,06

Lo spettro di risposta in direzione verticale è una chiave importante per valutare la posizione delle stazioni in relazione alle asperità. In questo caso il valore massimo di accelerazione viene raggiunto dalla stazione AQM, l'accelerazione è pari a 2,97 g, ben tre volte superiore al valore massimo della stazione successiva che è la AQV; ciò probabilmente significa che la AQM è la stazione più vicina all'asperità, data la netta differenza del valore di picco dell'AQM con le altre stazioni si potrebbe ritenere che questa stazione si trova in corrispondenza dell'asperità. In tutte le stazioni, ad esclusione della AQK, l'accelerazione massima si ha per un periodo di 0,06 s.

Un aspetto peculiare delle registrazioni in area epicentrale che ha molto influito sulle caratteristiche del danneggiamento degli edifici, è stato la concentrazione dell'energia ad alta frequenza e per pochi cicli (Sabetta et al., 2009). In linea generale il periodo naturale di vibrazione proprio di strutture rigide, come ad esempio un edificio in muratura a 2 piani, è pari a 0,15 s, quindi nel presente caso è questa tipologia di edifici che subisce un'accelerazione maggiore. Probabilmente si sono verificati numerosi danni (intensità macrosismica MCS da 6,5 a 9) in prossimità di queste stazioni proprio perché le costruzioni prevalenti nella zona erano in muratura di 2 o 3 piani, infatti negli spettri di risposta i valori sono molto elevati

nell'intervallo 2-10 Hz (0,1-0,5 s) che contiene le frequenze proprie della maggior parte degli edifici della regione. La durata della fase più energetica degli accelerogrammi è particolarmente breve, in media compresa tra 2 e 5 secondi. Nel caso della stazione AQV, quasi il 60% dell'energia è stato rilasciato nei primi 3 secondi. Ciò implica un forte impulso ad alta frequenza, anche nella componente verticale del moto, che ha colpito le strutture con un moderato numero di cicli ma di elevata ampiezza. La maggior parte delle strutture, non duttili, non ingegnerizzate e gli edifici in muratura non rinforzati non avevano la capacità di resistere al livello di scuotimento subito.

La presenza dell'asperità spesso influisce anche l'andamento degli spettri di risposta: nella figura 6.26 è riportato lo spettro di risposta completo della stazione AQA e lo spettro ottenuto dalla prima parte dell'accelerogramma della stazione AQA, ossia la parte che comprende la pulsazione dovuta alla prima asperità. Si nota che i due spettri hanno la stessa forma e che la differenza tra le aree sottese dai due spettri è poca; ciò potrebbe significare che l'asperità domina. Si è scelta la stazione AQA poiché osservando gli spettri di risposta sembrerebbe quella maggiormente influenzata dall'asperità.

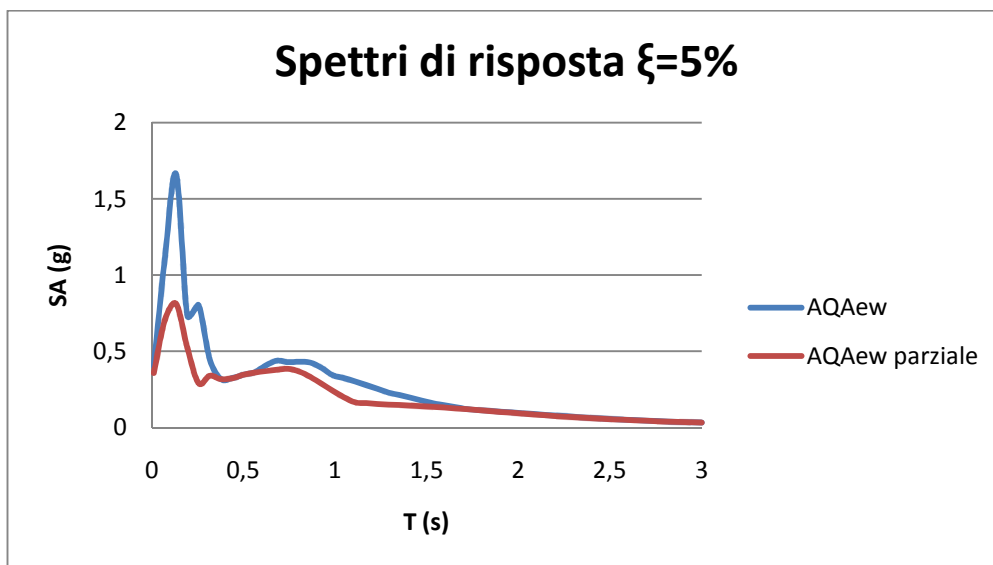


Figura 6.26. Confronto tra lo spettro di risposta totale della stazione AQA in direzione ew e lo spettro corrispondente solo alla parte riguardante l'influenza della prima asperità

Nelle figure 6.27, 6.28 e 6.29 sono rappresentati gli spettri di spostamento elastici per un coefficiente di smorzamento $\xi=5\%$ per le stazioni ubicate nel comune de L'Aquila.

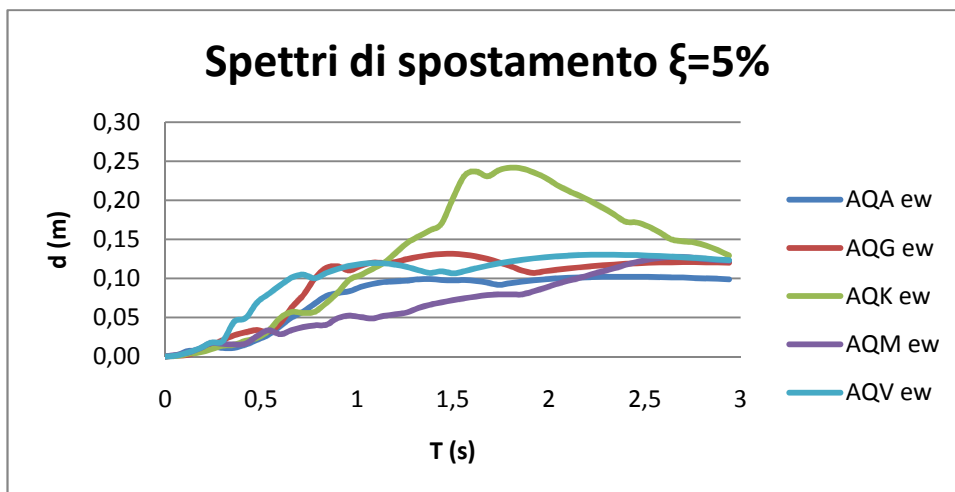


Figura 6.27. Spettri di spostamento per le cinque stazioni più prossime all'epicentro (direzione ew)

Tabella 6.13. Valore dello spostamento massimo per ogni registrazione considerata (direzione ew)

registrazione	AQA ew	AQG ew	AQK ew	AQM ew	AQV ew
d (m)	0,102	0,132	0,242	0,127	0,130
T (s)	0,024	0,015	0,018	0,027	0,023

Si nota che gli spostamenti massimi per la scossa principale sono dell'ordine di circa 10-15 cm, tranne che per la stazione AQK, per la quale si raggiunge un valore poco inferiore ai 25 cm; tale stazione è ubicata a L'Aquila città, mentre le altre si trovano nella valle dell'Aterno.

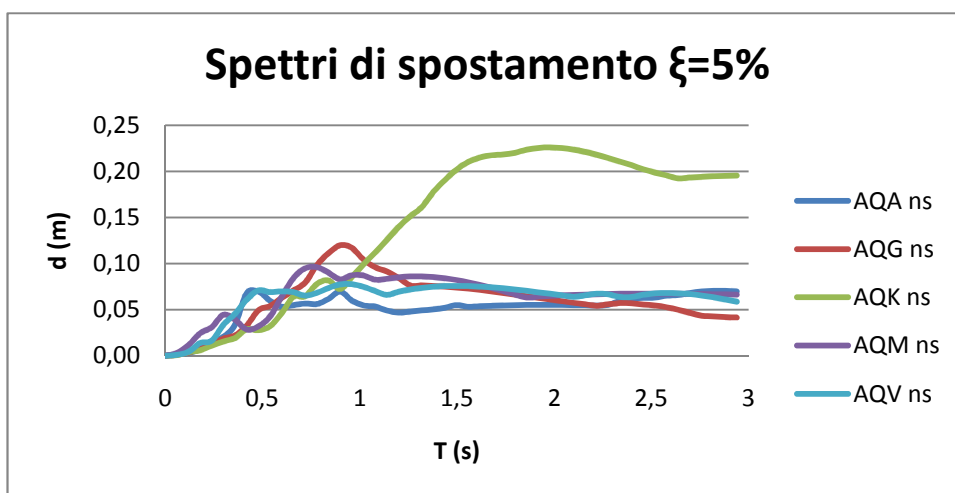


Figura 6.28. Spettri di spostamento per le cinque stazioni più prossime all'epicentro (direzione ns)

Tabella 6.14. Valore dello spostamento massimo per ogni registrazione considerata (direzione ns)

registrazione	AQA ns	AQG ns	AQK ns	AQM ns	AQV ns
d (m)	0,071	0,120	0,226	0,096	0,078
T (s)	0,029	0,009	0,020	0,008	0,010

Anche in questa direzione la registrazione di AQK presenta un valore massimo nettamente maggiore rispetto alle altre per un periodo naturale superiore a 1 s.

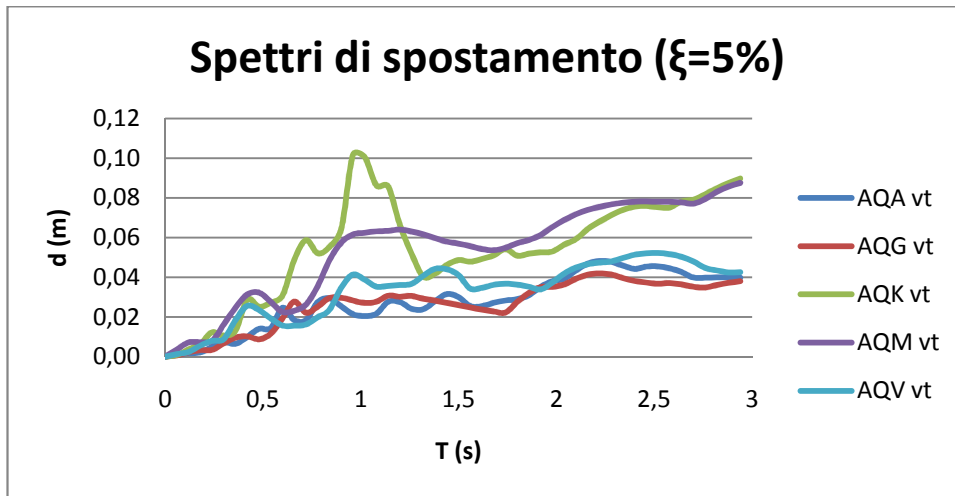


Figura 6.29. Spettri di spostamento per le cinque stazioni più prossime all’epicentro (direzione vt)

Tabella 6.15. Valore dello spostamento massimo per ogni registrazione considerata (direzione vt)

registrazione	AQA vt	AQG vt	AQK vt	AQM vt	AQV vt
d (m)	0,048	0,042	0,102	0,087	0,052
T (s)	0,022	0,022	0,010	0,029	0,025

Anche nel caso della componente verticale, i valori dello spettro di spostamento della stazione AQK si discostano nettamente da quelli delle altre stazioni.

6.6 Rapporti spettrali

E’ importante valutare la funzione di trasferimento di un sistema di strati ai fini di una corretta valutazione dell’amplificazione del moto del suolo durante terremoti.

Il rapporto spettrale tra una componente orizzontale e la componente verticale, detto rapporto H/V, registrate in una stazione è uno dei metodi sperimentali utilizzato per la stima della funzione di amplificazione sismica. Tale rapporto non riproduce fedelmente la funzione di amplificazione, ma è in grado di individuarne alcuni picchi, in particolare il primo. Bisogna ricordare che la tecnica H/V è in grado di stimare in modo affidabile solo la prima frequenza di risonanza del sistema di strati, inoltre non sono affidabili le stime né delle frequenze corrispondenti ai picchi successivi, né dei corrispondenti livelli di amplificazione (Faccioli e Paolucci, 2005).

Nel caso del terremoto de L’Aquila del 6 aprile 2009 l’elevato numero di stazioni sismiche installate unitamente alla grande quantità di dati raccolti nei centri abitati, in campo libero o in edifici, consente la

stima dei fenomeni di amplificazione locale attraverso tecniche empiriche, come ad esempio i rapporti spettrali tra le componenti orizzontali e la verticale alla singola stazione.

La figura 6.30 mostra il rapporto H/V valutato per la stazione AQK; le altre registrazioni della valle dell'Aterno sono presenti nell'appendice D.

I risultati per i siti esaminati mostrano una estrema variabilità della risposta sismica locale, i più rilevanti dei quali indicano amplificazioni comprese tra 1 e 5 Hz in corrispondenza di numerosi siti della valle dell'Aterno. La presenza di effetti di amplificazione locale può essere quindi considerato come un contributo importante per interpretare il forte danneggiamento di alcuni centri abitati.

La stazione AQK, posta nella città de L'Aquila, ha un'amplificazione elevata ad una frequenza bassa (di circa 0,5 Hz). Le stazioni AQV, AQA e AQM installate nella valle dell'Aterno mostrano una risposta a frequenze maggiori rispetto all'AQK (rispettivamente a 1,7 Hz, 2,3 Hz e 1,5 Hz).

Per queste stazioni si osservano amplificazioni di sito significative.

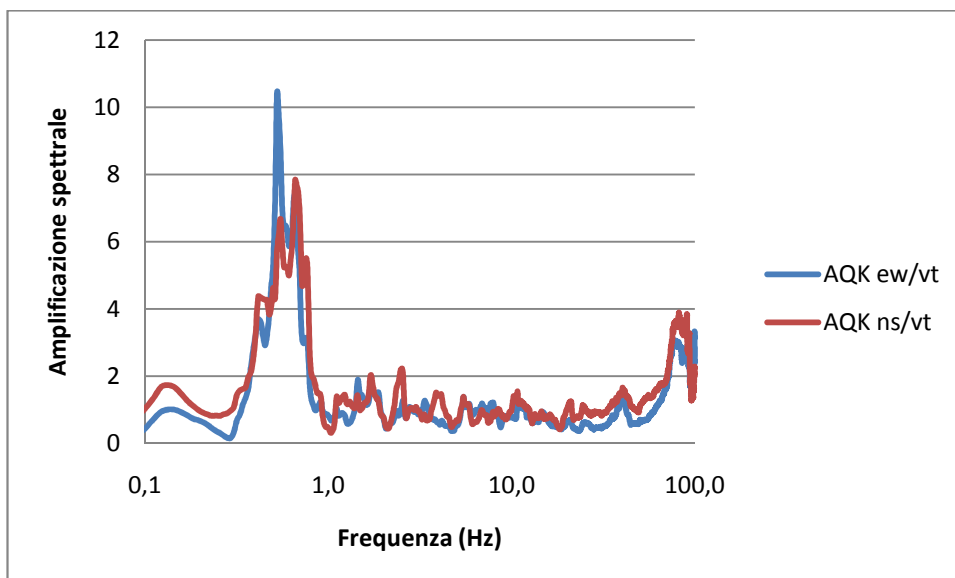


Figura 6.30. Rapporti H/V stazione AQK, scossa principale

6.7 Stazione AQM

I valori della stazione AQM sono stati considerati mal registrati in quanto il valore dell'accelerazione ha superato 1 g che è il valore soglia di registrazione.

Un messaggio del Dipartimento della Protezione Civile inviato il 6 ottobre 2009 dice: *“La postazione accelerometrica di AQM ha riportato dei danni in occasione dell'evento principale della sequenza sismica aquilana. La strumentazione installata è protetta da un ricovero in ferro fissato ad una platea di calcestruzzo al cui centro si trova il pilastro su cui è fissato il sensore. Il pilastro è separato lateralmente dal terreno circostante con fogli di polistirolo da 2 cm. In occasione dell'evento il ricovero ha perso parzialmente il suo ancoraggio alla platea, in particolare due dei quattro piedi del ricovero si sono staccati*

dalla platea stessa a causa dell'ossidazione in corrispondenza della saldatura alla piastra di ancoraggio. Questo potrebbe aver causato il sollevamento del ricovero sui due piedi rimasti fissati alla platea ed il conseguente martellamento nella direzione nord-sud. Questa ipotesi appare molto verosimile avendo sperimentato sia l'effetto che un sollevamento e una brusca ricaduta possono aver determinate sulla registrazione strumentale, sia il comportamento del ricovero in ferro su tavola vibrante bidirezionale sottoposto all'accelerogramma AQK. Per quanto sopra non si ritiene utilizzabile e quindi non pubblicabile la registrazione dell'evento principale della stazione AQM. Si ritiene inoltre che le registrazioni di AQM già pubblicate e relative agli eventi sismici successivi all'evento principale siano comunque da utilizzare con cautela, sebbene per gli eventi di minore intensità sia ipotizzabile che non ci sia stato sollevamento." (DPC, pers. Comm., 2009 R. Paolucci).

Nel presente lavoro si è scelto di analizzare anche la stazione AQM tenendo in considerazione che probabilmente da un certo istante in poi non ha funzionato correttamente.

In questo paragrafo si vogliono presentare alcune caratteristiche della registrazione che mostrano la validità, perlomeno parziale, dei dati.

La stazione AQM si trova nella valle dell'Aterno ad una latitudine di 42,379 e una longitudine di 13,349, ad un'elevazione dal livello del mare di 724 m.

Le registrazioni ottenute sono illustrate nella figura 6.31; in direzione ns è segnato il punto che probabilmente corrisponde all'istante in cui la registrazione non è affidabile in quanto si è verificata una parziale perdita dell'ancoraggio dello strumento alla base della stazione. Probabilmente la registrazione precedente a questo istante è valida e quindi è possibile osservare l'impulso forse causato dalla presenza dell'asperità sul piano di faglia, proprio in corrispondenza della stazione AQM (figura 6.32).

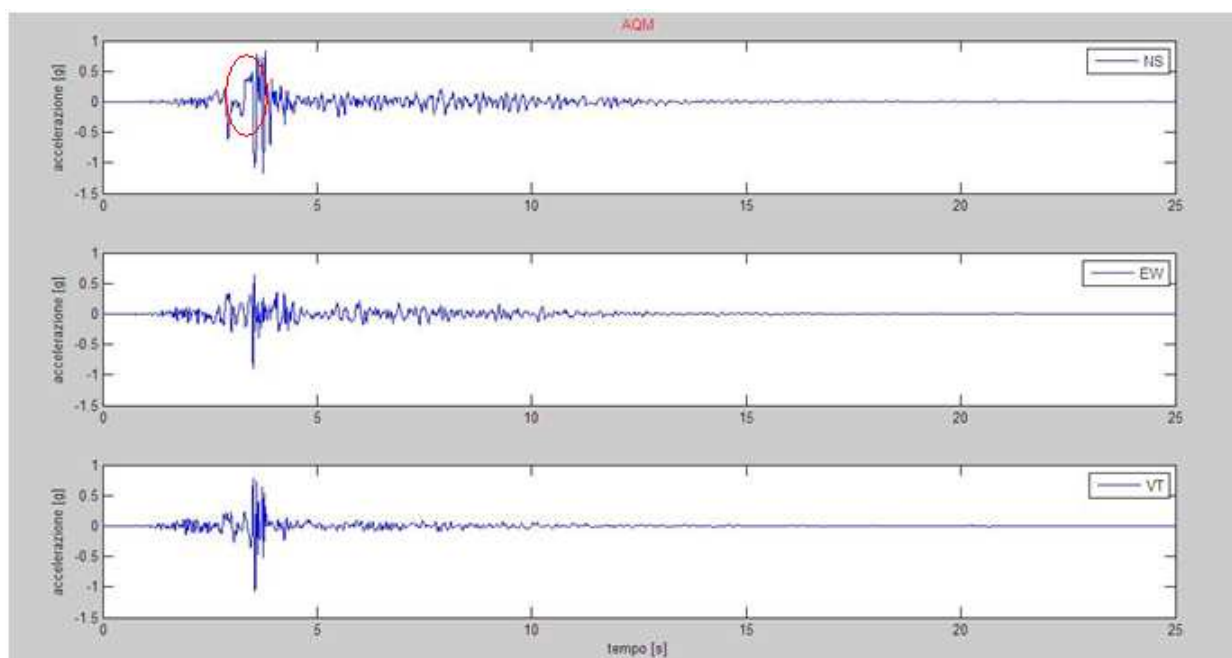


Figura 6.31. Accelerogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQM

Facendo riferimento alla figura 6.16, in cui è riportato il primo impulso dello spostamento in direzione ew per le stazioni AQG, AQV, AQK, AQA, AQM e GSA, si nota che tutte stazioni, compresa la AQM, presentano l'impulso dello stesso periodo, della durata di 1 secondo, ciò significa che la registrazione della stazione AQM almeno nei primi secondi è coerente con le altre registrazioni inoltre l'impulso dell'AQM ha una forma analoga alle altre stazioni.

E' possibile fare delle osservazione riguardanti la possibile validità della stazione AQM anche osservando gli spettri di risposta, in questo caso particolare lo spettro in direzione ns. Generalmente si ha un fattore amplificativo di 2,5 tra l'accelerazione massima per T=0 e l'accelerazione corrispondente al primo picco; questa regola di massima è rispettata anche nel caso delle registrazioni in AQM, come mostrato nel caso specifico nel grafico 6.32, (in tabella 6.16 sono riportati i valori delle accelerazioni nelle tre direzioni per T=0 e in corrispondenza del primo picco).

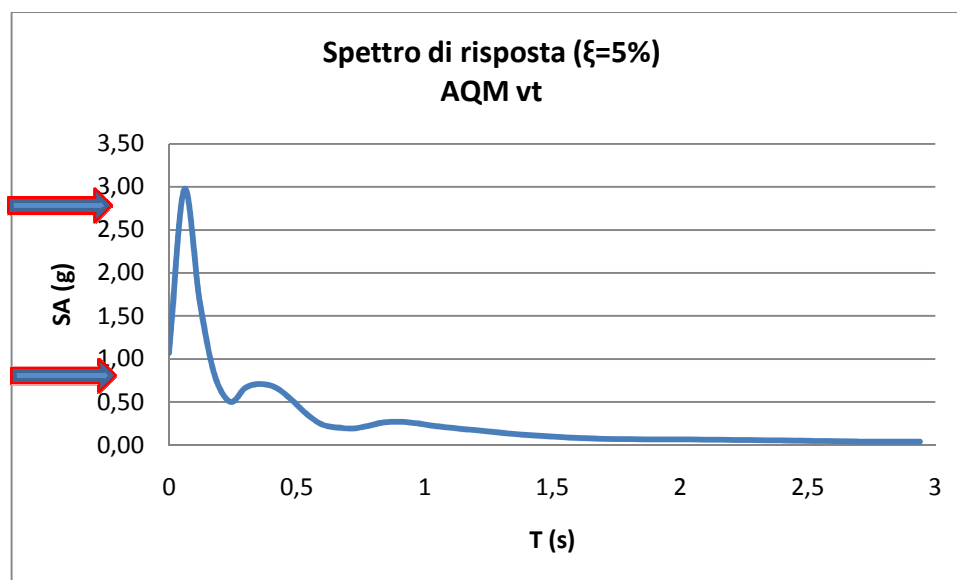


Figura 6.32. Spettro di risposta stazione AQM direzione verticale

Tabella 6.16. Valori delle accelerazioni per T=0 e in corrispondenza del primo picco

AQM	ew	ns	vt
SA (g) a T=0	0,91	1,18	1,07
SA (g) al picco	1,85	2,68	2,97

Si è ampiamente discusso precedentemente, in particolare nel paragrafo 6.3.3, della possibile presenza di due asperità sul piano di faglia. Un'asperità probabilmente si trova in corrispondenza delle quattro stazioni poste nella valle dell'Aterno; la presenza di questa rugosità sul piano di faglia potrebbe essere una spiegazione dell'alto valore del PGA registrato nella direzione orizzontale ns superiore ad 1 g (è stato registrato un PGA=1,166 g).

Alla luce delle argomentazioni riportate in questo paragrafo si conclude che le registrazioni della stazione AQM hanno diversi aspetti validi.

6.8 Conclusioni

L'evento sismico del 6 aprile 2009 è stato registrato da 57 stazioni accelerometriche della RAN (Rete Accelerometrica Nazionale) 5 delle quali si trovano sulla proiezione del piano di faglia in superficie. La stazione AQK si trova nella città de L'Aquila ed è ubicata all'imbocco della galleria pedonale che consente l'accesso al centro storico della città dal parcheggio del terminal delle autolinee regionali e quindi non è situata nel centro storico della città.

Dallo studio degli accelerogrammi si osserva una durata del movimento sismico principale di 12 secondi.

Il valore massimo di PGA (PGV) è $11,47 \text{ m/s}^2$ ($0,46 \text{ m/s}$) registrato nella stazione AQM (AQV), in generale tutti i PGA delle stazioni ubicate sulla proiezione della faglia in superficie (AQA, AQG, AQK, AQM e AQV) sono maggiori di $3,5 \text{ m/s}^2$ e i PGV sono maggiori di $0,3 \text{ m/s}$.

Sia per le accelerazioni che per le velocità e gli spostamenti si nota un impulso di lunga durata all'inizio del moto; tali impulsi, che si presentano spesso in condizioni di near-field e non avvengono talvolta in concomitanza del picco in accelerazione, hanno un forte contenuto energetico e potrebbero essere rappresentativi di una asperità probabilmente situata in corrispondenza della zona delle stazioni AQA, AQG, AQM e AQV. L'impulso ha un periodo di 1 secondo, ciò significa che l'asperità potrebbe avere un diametro approssimativamente di 3 km.

Le zone maggiormente danneggiate si trovano in direzione sud-est partendo dall'asperità più a nord, dove sono ubicate le quattro stazioni di registrazione; questo direzionamento dei danni probabilmente riflette una combinazione tra la direttività della rottura e gli effetti sismici di amplificazione litostratigrafica.

La presenza delle due asperità potrebbe aver influenzato il livello di danno di diversi centri abitati portando ad un valore del potenziale distruttivo più elevato rispetto ad un ipotetico caso di faglia senza rugosità.

In seguito al confronto tra i dati registrati durante la scossa principale del 6 aprile 2009 e l'andamento della relazione di attenuazione formulata da Akkar-Bommer si osserva che i dati seguono più coerentemente la relazione generale per una distanza compresa tra i 5 e i 100 km di distanza, in generale i dati near-source sono sottostimati e le registrazioni ottenute ad una distanza maggiore di 100 km sono sovrastimate. L'aspetto delle asperità non viene preso in considerazione nelle relazioni di attenuazione e conseguentemente si possono osservare dei valori di accelerazione più alti di quelli previsti e quindi anche un livello di danno maggiore.

Dall'analisi delle registrazioni ottenute in AQM si notano alcune caratteristiche comuni a quelle delle altre stazioni, ciò potrebbe significare che le registrazioni della stazione AQM abbiano diversi aspetti validi.

7 Parametri caratteristici del potere distruttivo del terremoto

7.1 Introduzione

E' necessario definire parametri rappresentativi della severità di un terremoto a partire dall'informazione data dalla registrazione strumentale del movimento del suolo, per poter così contare su un criterio che permetta di selezionare registrazioni significative per la progettazione sismica.

Per valutare la severità di un terremoto esistono scale di intensità, le quali stimano gli effetti del terremoto basandosi sull'osservazione dei danni.

Considerando l'innegabile valore delle scale non strumentali, in modo particolare per terremoti storici, a fini di ricerca e di progettazione sismica, è necessario che il problema della distruttività sia affrontato attraverso criteri strumentali, ossia associando il livello di danno alle registrazioni delle accelerazioni.

Usando le informazioni ottenute dalle registrazioni strumentali, diversi autori hanno proposto parametri che mirano a valutare la capacità di danno di un terremoto. Questi parametri considerano: stima di valori strumentali estremi, integrazione delle registrazioni nel dominio del tempo, valutazione del contenuto in frequenza o caratteristiche delle frequenze, integrazione parametrica dell'equazione del moto di un sistema ad un grado di libertà e successiva analisi dei suoi risultati e parametri che combinano risultati ottenuti per alcune delle analisi anteriori.

Tra i parametri proposti per valutare la distruttività si trovano: il Potenziale Distruttivo di Araya e Saragoni (P_D), l'Intensità di Arias (I_A), l'Accelerazione Massima del Suolo (PGA) e l'Intensità Spettrale di Housner ($SI(\xi)$) descritti nel presente paragrafo. In particolare viene discusso il Potenziale Distruttivo (P_D), considerato il parametro più rappresentativo per valutare l'intensità di un dato terremoto o la sua capacità di produrre danni e che quindi meglio si correla col danno osservato.

7.2 Potenziale Distruttivo di Araya e Saragoni (P_D)

La formulazione energetica è certamente attraente per definire la severità dello scuotimento sismico che potrebbe colpire i centri urbani. Si è ritenuto che si potesse definire un'azione sismica di progetto appropriata, utile sia per le nuove costruzioni che per l'adeguamento di quelle esistenti.

Un fattore di potenziale distruttivo, P_D , che consideri sia l'intensità di Arias che l'intensità degli incroci con lo zero, v_0 (figura 7.1), è stato proposto da Araya e Saragoni (1984):

$$P_D = \frac{I_A}{v_0^2} \quad \text{eq. 7.1}$$

dove v_0 è il numero delle intersezioni in un secondo dell'accelerogramma con l'asse dei tempi (figura 7.1) e I_A è l'intensità di Arias (1969) definita da:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^T \ddot{u}_g^2(t) dt \quad \text{eq. 7.2}$$

dove T e \ddot{u}_g sono la durata totale e l'accelerazione del terreno rispettivamente. L'intensità di Arias rappresenta la somma delle energie totali per unità di massa immagazzinate in oscillatori appartenenti a una popolazione di oscillatori lineari non smorzati uniformemente distribuiti, così come le loro frequenze, alla fine del terremoto.

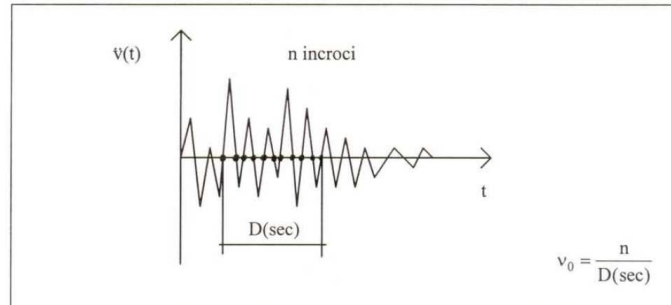


Figura 7.1. Illustrazione del valore di v_0

Con I_A si tiene conto dell'effetto dell'accelerazione massima del terreno e la durata dello strong motion, mentre con v_0 si considera il contenuto in frequenze; quindi il potenziale distruttivo include un'ampia quantità di informazioni che danno luogo ad una buona correlazione con le Intensità Macrosismiche.

Utilizzando la somma delle due componenti orizzontali della registrazione accelerometrica si definisce il Potere Distruttivo Orizzontale come $P_{DH} = P_{DX} + P_{DY}$, espresso in unità $m*s$ (spesso espresso in $10^{-4} g s^3$). Si è soliti prestare attenzione alla componente orizzontale poiché la maggior parte delle strutture sono più sensibili ai movimenti orizzontali delle fondazioni che a quelli verticali (Arias 1969).

Saragoni et al. nel 1989, lavorando su registrazioni cilene e nordamericane, hanno dedotto correlazioni tra I_{MM} e il P_{DH} praticamente coincidenti per entrambi i gruppi di accelerogrammi. Il che può interpretarsi come una dimostrazione del fatto che il Potenziale Distruttivo costituisca una misura della capacità di produrre danni indipendentemente dal tipo di terremoto.

Considerando la totalità degli accelerogrammi cileni e nordamericani con $P_{DH} > 0,02 m*s$ (corrispondente ad intensità VI-VII MM, e pertanto all'inizio del danno effettivo), i suddetti autori stabilirono la seguente correlazione:

$$\log P_{DH}(10^{-4} g s^3) = 0,00066 I_{MM} - 0,003 (m s) \quad \text{eq. 7.3}$$

7.2.1 Raccolta dati e calcolo del Potenziale Distruttivo

Nella tabella 7.1 sono riportati, per le registrazioni del terremoto de L'Aquila, i valori del PDH dato dalla somma delle due componenti orizzontali, espresso in $m*s$, inoltre sono presenti il numero delle intersezioni in un secondo dell'accelerogramma con l'asse dei tempi, i valori dell'Intensità di Arias, dell'intervallo temporale considerato ($\Delta t = t_2 - t_1$) e dell'accelerazione di picco (accelerogrammi dal sito CESMD: Center for Engineering Strong Motion Data: www.strongmotioncenter.org) (si ricorda che la fonte ufficiale dei dati accelerometrici per i terremoti italiani è ITACA: <http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet/>).

I risultati della stazione L'Aquila-V.Aterno-il Moro (AQM) sono stati aggiunti in un secondo momento quando è stato possibile ottenerne gli accelerogrammi, non disponibili nei siti internet poiché ritenuti mal registrati; si è deciso di analizzare comunque questi valori per utilizzare eventuali informazioni interessanti.

I valori delle Intensità Macrosismiche sono stati ricavati dagli studi condotti dall'INGV che ha fornito la mappa riportata in figura 4.5 (capitolo 4) ed il piano quotato terrestre del terremoto del 6 aprile 2009 riferito alle località rilevate dalle squadre QUEST (QUick Earthquake Survey Team) che lavora per l'INGV e riunisce un team di esperti dedicato al rilievo macrosismico post-terremoto in grado di intervenire in tempo reale, e di fornire, rapidamente ed univocamente, il quadro degli effetti nell'area colpita da un evento sismico, a supporto degli interventi di Protezione Civile e della Comunità Scientifica (Galli e Camassi, 2009).

Tabella 7.1. Valori del Potenziale Distruttivo delle 17 stazioni accelerometriche principali per il terremoto del 6 aprile 2009 e relativi dati aggiuntivi, per le due componenti orizzontali e per la componente verticale.

Sono indicati il nome della località in cui si trova la stazione di registrazione ed il valore dell'intensità macrosismica attribuitogli dall'INGV

Stazione	componente	PD (m*s)	PDH (m*s)	I_A (m/s)	v_0	t1 (s)	t2 (s)	$A_{max}(m/s^2)$
AQV	H90	1,274E-02	2,352E-02	2,847	14,9	30,6	56	6,62
cansatessa	H360	1,078E-02		2,001	13,9			5,50
Imcs 6,5	V	1,936E-03		0,997	22,7			5,07
AQK	H90	6,220E-03	1,374E-02	1,038	12,9	30,4	64	3,24
l'aquila	H360	7,517E-03		1,283	13,1			3,53
Imcs 8,5	V	8,173E-03		1,182	12,0			3,66
AQG	H90	5,705E-03	1,295E-02	1,379	15,5	30,6	60	4,73
coppito	H360	7,242E-03		1,367	13,7			5,05
Imcs 6,5	V	7,878E-04		0,345	20,9			2,68
AQA	H90	3,547E-03	9,162E-03	1,606	21,3	15,5	35	3,97
coppito	H360	5,615E-03		1,738	17,6			4,30
Imcs 6,5	V	9,415E-04		0,758	28,4			4,79
ANT	H90	2,997E-04	1,183E-03	0,008	5,3	29,6	80	0,20
antrodoco	H360	8,831E-04		0,018	4,4			0,26
Imcs 5	V	9,203E-05		0,003	5,8			0,11
AVZ	H90	3,692E-03	9,045E-03	0,077	4,6	29	80	0,55
avezzano	H360	5,352E-03		0,097	4,3			0,68
Imcs 5	V	5,924E-04		0,024	6,3			0,26
BOJ	H90	1,141E-03	2,152E-03	0,012	3,3	24	95	0,13
bojano	H360	1,010E-03		0,013	3,6			0,14
Imcs 4,5	V	2,082E-04		0,002	3,4			0,05

CDS	H90	2,963E-04	6,244E-04	0,004	3,7	26	100	0,10
castel di sangro	H360	3,281E-04		0,003	3,3			0,09
Imcs 4,5	V	1,454E-04		0,002	3,6			0,07
CHT	H90	1,506E-03	2,827E-03	0,038	5,0	30	90	0,28
chieti	H360	1,321E-03		0,032	4,9			0,29
Imcs 5	V	4,774E-04		0,013	5,2			0,17
CLN	H90	1,322E-04	2,777E-04	0,037	16,8	28,2	52	0,81
celano	H360	1,455E-04		0,039	16,5			0,89
Imcs 5,5	V	8,389E-05		0,017	14,3			0,45
CSO1	H90	2,582E-04	4,778E-04	0,008	5,5	29,5	80	0,18
carsoli	H360	2,196E-04		0,006	5,1			0,17
Imcs 5	V	1,158E-04		0,005	6,4			0,16
FMG	H90	4,638E-04	7,867E-04	0,012	5,1	30	90	0,24
fiamignano	H360	3,229E-04		0,010	5,6			0,26
Imcs 5,5	V	1,601E-04		0,008	7,2			0,19
GSA	H90	2,142E-03	4,713E-03	0,403	13,7	14,8	60	1,49
assergi	H360	2,572E-03		0,440	13,1			1,42
Imcs 6	V	6,410E-04		0,142	14,9			1,07
GSG	H90	5,013E-05	1,055E-04	0,006	11,0	30	52	0,21
zona disabitata	H360	5,541E-05		0,009	12,6			0,29
	V	4,758E-05		0,006	11,4			0,19
MTR	H90	3,779E-04	8,279E-04	0,033	9,4	14	55	0,43
montereale	H360	4,499E-04		0,058	11,4			0,62
Imcs 5	V	1,480E-04		0,014	9,5			0,23
ORC	H90	6,760E-04	1,072E-03	0,040	7,7	14,5	50	0,64
ortucchio	H360	3,958E-04		0,025	7,9			0,40
Imcs 5	V	1,154E-04		0,008	8,6			0,30
SUL	H90	1,911E-04	4,218E-04	0,009	7,0	14,5	60	0,34
badia-bagnaturo	H360	2,307E-04		0,010	6,6			0,27
Imcs 5	V	1,273E-04		0,005	6,2			0,24
AQM	H90	1,470E-02	1,961E+00	3,859	16,5	0,65	14	11,43
cansatessa	H360	4,907E-03		1,534	17,7			8,73
Imcs 6,5	V	6,354E-03		1,513	15,4			10,39

7.2.2 Andamento Pd-I_{MCS}

Si osserva che l'andamento dei risultati (figura 7.2), ad esclusione del dato riguardante la stazione AQK, è ben colto dalla curva di Araya e Saragoni espressa dall'equazione 7.3.

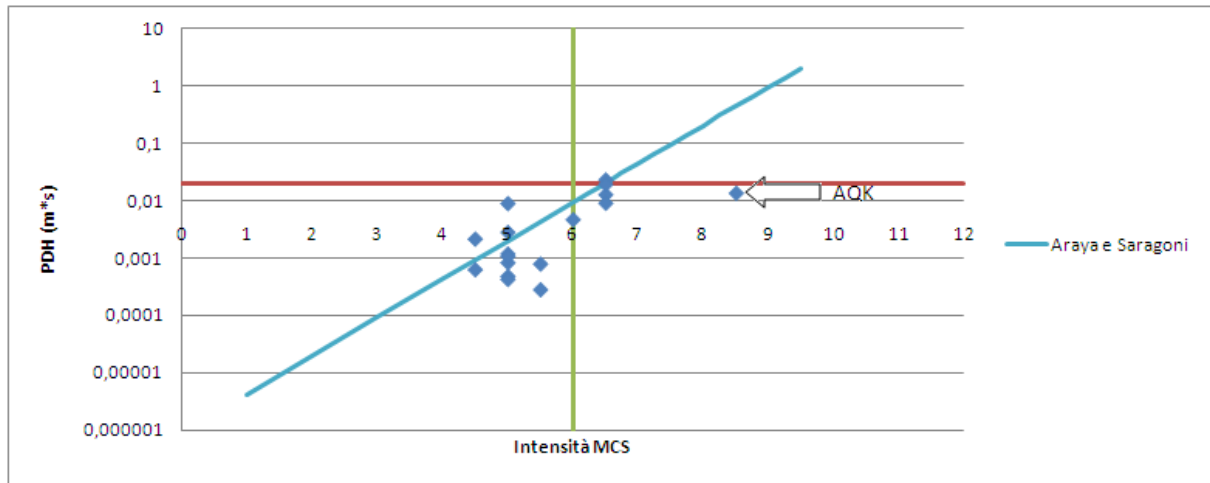


Figura 7.2. Relazione tra il potenziale distruttivo orizzontale e l'intensità macrosismica per il terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009

Non si è fatta distinzione tra la scala MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg) ed IMM (Intensità Mercalli Modificata) utilizzate rispettivamente dalla classificazione italiana e dalla formula di Saragoni poichè per una intensità fino al grado IX le due scale risultano praticamente coincidenti, come riportato in figura 7.3.

Scale	Year	Scale	Scale
M.S.K.	1964	(MEDVEDEV SPONHEIJER KARNIKI)	I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XI, XII
F.M.I.	1964	(Echelle macro-sismique internat)	I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XI, XII
MERCALLI MODIFIED NEW ZEALAND	1965	(IEBY)	I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XI, XII
MERCALLI MODIFIED	1956	(RICHTER)	I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XI, XII
GEOFAN URSS	1953	(MEDVEDEV)	I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XI, XII
JAPAN CENTRAL OBS.	1951	(MODIFIED KAWASUMI)	0, I, II, III, IV, V, VI, VII
MERCALLI CANCEANI SIEBERG	1942	(MODIFIED ROTHE)	I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XI, XII
JAPAN CENTRAL OBS.	1932	(SHIMOTO)	0, I, II, III, IV, V, VI
MERCALLI MODIFIED	1931	(WOOD-NEUMANN)	I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XI, XII
MERCALLI CANCEANI SIEBERG	1917		I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XI, XII
MERCALLI	1902		I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X
ROSS-FOREL	1873		I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X

Figura 7.3. Comparazione tra le diverse scale di intensità macrosismica (Medvedev et al., 1963)

Dalla figura 6.7 si osserva che la stazione AQK non si trova nel centro della città quindi può darsi che, nonostante si trovi nella città de L'Aquila, non sia in un luogo rappresentativo del livello di distruttività del centro abitato; probabilmente essendo posta su terreno di tipo B (fonte: INGV) porta ad un valore di v_0 (intensità degli incroci con lo zero) elevato e conseguentemente un valore del P_D basso. Il fatto che il valore del P_{DH} non sia correlato col corrispondente valore dell'Intensità Macrosismica (I_{MCS} L'Aquila = 8,5) può essere spiegato in quanto il valore del P_D lo si ricava dai dati accelerometrici della stazione, mentre il valore dell'Intensità Macrosismica da uno studio sul centro abitato; nel caso della stazione AQK i due elementi non corrispondono geograficamente in quanto l'Intensità Macrosismica è stata stabilita considerando il solo centro storico, mentre la stazione si trova ai piedi della collina che contiene il centro (paragrafo 6.2), ciò può portare ad una incongruenza del genere. Tenendo in considerazione un valore dell'intensità macrosismica minore (si considera I_{MCS} L'Aquila=7, che è una media tra il grado stabilito tramite i questionari di "hai sentito il terremoto?" paragrafo 4.4, e quello stabilito dall'INGV basandosi sul solo centro storico), il punto riguardante la registrazione dell'AQK risulterebbe più coerente con l'andamento generico studiato da Araya e Saragoni (figura 7.4). Si fa presente che anche nello scritto di Tertulliani et al del maggio 2010, in cui viene presentata l'osservazione dei danni a L'Aquila basandosi sulla scala EMS98 (European Macroseismic Scale 1998), viene scritto che "la valutazione del valore dell'intensità dedotta dallo studio non può essere estesa all'area metropolitana de L'Aquila, che non si è potuta studiare in dettaglio, e per la quale è necessario attribuire un'altra intensità".

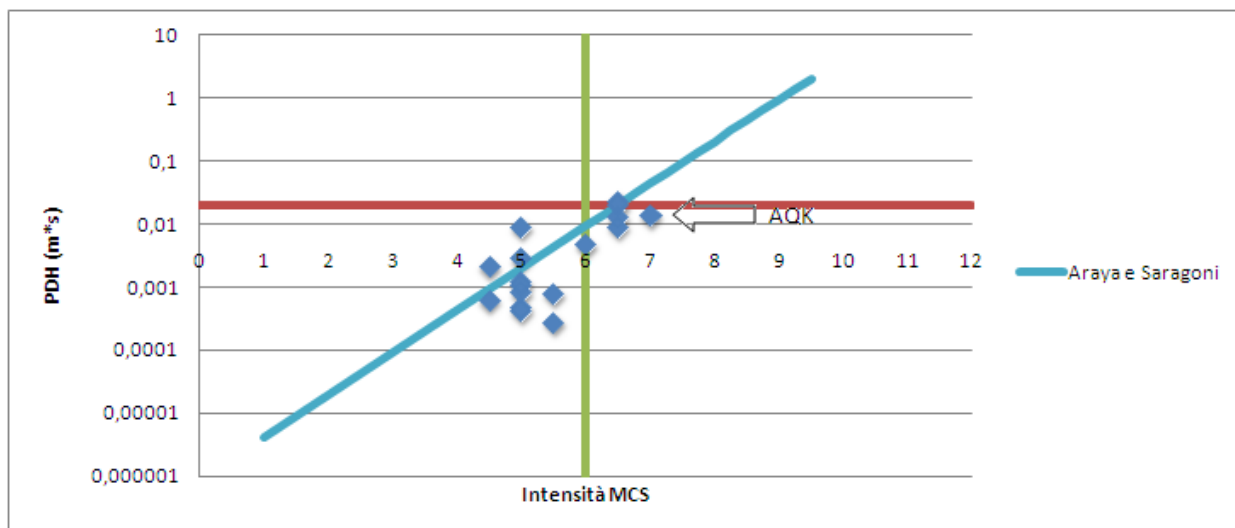


Figura 7.4. Relazione tra il potenziale distruttivo orizzontale e l'intensità macrosismica per il terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009; l'Intensità Macrosismica per la stazione AQK è stata modificata ad un valore 7

7.2.3 Confronto con altri terremoti italiani

I valori del Potenziale Distruttivo del terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009 sono stati confrontati con quelli dei maggiori terremoti italiani (dati e valori ottenuti direttamente dal Dr. Mollaioli F. (Università di Roma, La Sapienza)). Nella tabella 7.2 sono riportati i dati degli eventi nell'ordine decrescente rispetto al P_D , le stazioni riguardanti L'Aquila sono state evidenziate.

Si può facilmente notare che le registrazioni dell'aquilano si trovano ai primi posti; ciò è giustificato dal fatto che il terremoto del 6 aprile 2009 è stato registrato da ben 57 stazioni accelerometriche, 4 delle quali poste ad una distanza epicentrale tra i 4,4 e i 5,6 km. Il terremoto de L'Aquila è stato l'evento meglio registrato fino ad oggi in Italia.

L'evento che ha registrato un valore del P_D successivo a quello de L'Aquila è stato il terremoto del 23 novembre 1980 dell'Irpinia. Tale sisma colpì la Campania centrale e la Basilicata; caratterizzato da una magnitudo 6,5 della scala Richter, con epicentro nel comune di Conza della Campania (AV), causò circa 280.000 sfollati, 8.848 feriti e 2.914 morti.

Nella tabella 7.2 sono stati riportati i raggi epicentrali delle sole stazioni accelerometriche riguardanti i terremoti de L'Aquila del 6 aprile 2009 e dell'Irpinia del 23 novembre 1980; è evidente che per il terremoto de L'Aquila si hanno registrazioni più prossime all'epicentro (R_{epi} minimo 4,4 km) rispetto al caso del terremoto dell'Irpinia (R_{epi} minimo 18,9 km).

Nella figura 7.5 sono riportate le posizioni delle postazioni accelerometriche del terremoto del 23 novembre 1980 dell'Irpinia rispetto all'epicentro.

Tabella 7.2. Registrazioni dei terremoti italiani principali degli ultimi anni, ordinati secondo i valori del P_D . In nero sono segnate le stazioni posizionate su suolo di tipo A, in blu su suolo B e in rosso su suolo C. Le stazioni del terremoto de L'Aquila del 2009 sono evidenziate in rosa, quelle riguardanti il terremoto dell'Irpinia del 1980 in azzurro. Dati e valori ottenuti direttamente dal Dr. Mollaioli F. (Università di Roma, La Sapienza)

Earthquake	Date	Mw	Station	I_{arias} (m/s)	v_0	P_D (m*s)	Soil EC8	Repi (km)
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	AQM H360	3,859	16,48	1,472E-02	A	5,2
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	AQV H90	1,367	14,88	7,250E-03	B	4,9
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	AQV H360	1,379	13,90	5,711E-03	B	4,9
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	AQK H360	1,534	13,07	4,912E-03	B	5,6
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	AQG H360	0,440	13,74	2,574E-03	A	4,4
Irpinia, Italy	23/11/1980	6,9	CALITWE	0,403	4,56	2,144E-03	B	18,9
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	AQK H90	0,285	12,92	1,736E-03	B	5,6
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	AQG H90	0,234	15,54	1,727E-03	A	4,4
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	AQA H360	2,876	17,59	1,118E-03	B	4,6
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	AVZ H360	3,320	4,25	9,614E-04	C	34,9
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	AQM H90	0,018	17,68	8,840E-04	A	5,2
Irpinia, Italy	23/11/1980	6,9	CALITNS	0,442	4,78	5,690E-04	B	18,9
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	AVZ H90	0,012	4,57	4,642E-04	C	34,9
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	AQA H90	0,349	21,28	4,316E-04	B	4,6

L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	GSA H360	1,387	13,08	3,630E-04	A	18
Irpinia, Italy	23/11/1980	6,9	STURWE	0,010	7,81	3,233E-04	B	33,3
Irpinia, Italy	23/11/1980	6,9	STURNS	0,008	7,39	3,000E-04	B	33,3
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	GSA H90	0,986	13,72	2,943E-04	A	18
Friuli, Italy	06/05/1976	6,5	TOLMEZWE	0,254	7,48	2,747E-04	B	
Irpinia, Italy	23/11/1980	6,9	BISACNS	0,010	4,01	2,310E-04	A	28,3
Irpinia, Italy	23/11/1980	6,9	BISACWE	0,009	3,65	1,913E-04	A	28,3
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	CHT H90	0,124	5,03	1,864E-04	B	67
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	CHT H360	0,126	4,92	1,766E-04	B	67
Irpinia, Italy	23/11/1980	6,9	MERSEVWE	0,039	6,48	1,456E-04	B	46,1
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	BOJ H90	0,037	3,27	1,324E-04	B	133,4
Umbria-Marche	26/09/1997	6	R1168EW	0,096	15,90	1,079E-04	A	
Irpinia, Italy	23/11/1980	6,9	RIOVULNS	0,088	7,64	1,079E-04	B	35,5
Friuli	11/09/1976	5,5	BUI11SNS	0,463	5,14	9,810E-05	C	
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	BOJ H360	0,246	3,61	7,848E-05	B	133,4
Umbria-Marche	26/09/1997	6	R1168NS	0,181	18,41	7,848E-05	A	
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	ANT H360	0,173	4,44	7,848E-05	A	23
Irpinia, Italy	23/11/1980	6,9	MERSEVNS	0,145	6,33	6,867E-05	B	46,1
Friuli, Italy	06/05/1976	6,5	TOLMEZNS	0,033	10,05	5,886E-05	B	
Irpinia, Italy	23/11/1980	6,9	BRIENZNS	0,009	8,31	5,546E-05	B	42,2
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	ORC H90	0,006	7,75	5,018E-05	C	49,3
Irpinia, Italy	23/11/1980	6,9	BRIENZWE	0,176	8,46	3,924E-05	B	42,2
Irpinia, Italy	23/11/1980	6,9	BAGNIRWE	0,059	8,73	3,924E-05	A	21,8
Friuli	15/09/1976	6	FCO15BWE	0,127	12,06	2,943E-05	B	
Irpinia, Italy	23/11/1980	6,9	RIOVULWE	0,148	9,60	2,943E-05	B	35,5
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	FMG H90	0,223	5,07	2,943E-05	A	19,3
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	MTR H360	0,135	11,37	2,943E-05	B	22,4
Irpinia, Italy	23/11/1980	6,9	BAGNIRNS	0,034	8,96	2,943E-05	A	21,8
Friuli, Italy	15/09/1976	6	BFOC270	0,059	9,43	2,943E-05	B	
Friuli, Italy	15/09/1976	6	BBUI000	0,119	5,91	1,962E-05	C	
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	ORC H360	0,100	7,92	1,962E-05	C	49,3
Friuli	15/09/1976	6	FCO15BNS	0,039	11,77	1,962E-05	B	
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	MTR H90	0,026	9,41	1,962E-05	B	22,4
Basso Tirreno 1978	15/04/1978		PATTIWE	0,031	6,97	9,810E-06	C	
Umbria-Marche	26/09/1997	5,7	R1164NS	0,040	19,27	9,810E-06	A	
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	CDS H360	0,021	3,26	9,810E-06	B	88,4
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	FMG H360	0,008	5,62	0,000E+00	A	19,3
Sicilia Sud Orientale 1990	13/12/1990		CATNS	0,008	8,59	0,000E+00	C	
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	ANT H90	0,076	5,32	0,000E+00	A	23
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	CDS H90	0,087	3,68	0,000E+00	B	88,4
Umbria-Marche	26/09/1997	5,7	R1164EW	0,020	18,07	0,000E+00	A	
Friuli	15/09/1976	6	SRO15BWE	0,018	9,56	0,000E+00	A	
Sicilia Sud Orientale 1990	13/12/1990		CATWE	0,006	9,21	0,000E+00	C	
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	CSO1 H90	0,004	5,52	0,000E+00	B	32,9
Friuli, Italy	15/09/1976	6	BFOC000	0,006	11,03	0,000E+00	B	

Friuli, Italy	06/05/1976	6,5	CODR270	0,006	7,31	0,000E+00	C	
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	SUL H360	0,012	6,57	0,000E+00	A	56,4
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	CSO1 H360	0,015	5,07	0,000E+00	B	32,9
Friuli, Italy	15/09/1976	6	BBUI270	2,847	7,05	1,275E-02	C	
Friuli, Italy	06/05/1976	6,5	CODR000	2,001	8,19	1,079E-02	C	
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	SUL H90	1,283	7,03	7,525E-03	A	56,4
Umbria 1984	29/04/1984		PIETRLWE	1,357	8,01	6,406E-03	A	
Umbria 1984	29/04/1984		PIETRLNS	1,038	8,31	6,227E-03	A	
Friuli	11/09/1976	5,5	BUI11SWE	1,738	6,86	5,621E-03	C	
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	CLN H360	1,055	16,47	4,532E-03	A	31,6
Sicilia Sud Orientale 1990	13/12/1990		NOTOWE	1,606	5,87	3,550E-03	C	
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	CLN H90	1,475	16,85	2,374E-03	A	31,6
Basso Tirreno 1978	15/04/1978		PATTINS	1,265	8,07	2,266E-03	C	
Friuli	15/09/1976	6	SRO15BNS	1,192	9,38	2,090E-03	A	
Friuli, Italy	15/09/1976	6	BSRO270	0,038	9,12	1,508E-03	A	
Sicilia Sud Orientale 1990	13/12/1990		NOTONS	0,032	6,44	1,322E-03	C	
Friuli	15/09/1976	6	BRE_YA	0,522	21,34	1,216E-03	A	
Norcia (Valnerina)	19/09/1979		FCSCNS	0,012	17,10	1,142E-03	A	
Norcia (Valnerina)	19/09/1979		FCSCWE	0,613	15,10	1,030E-03	A	
Umbria 1984	29/04/1984		NOCUMBNS	0,013	14,52	1,012E-03	A	
Umbria 1984	29/04/1984		NOCUMBWE	0,314	14,03	7,652E-04	A	
Umbria-Marche	14/10/1997	5,7	R1315EW	0,780	12,63	7,554E-04	C	
Friuli, Italy	15/09/1976	6	BSRO000	0,515	7,60	7,358E-04	A	
Umbria-Marche	26/09/1997	6	R1187EW	0,430	13,04	5,886E-04	C	
Sicilia Sud Orientale 1990	13/12/1990		SORTNS	0,848	9,39	5,690E-04	C	
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	GSG H360	0,469	12,59	5,003E-04	A	22,6
L'Aquila, Italy	06/04/2009	6,3	GSG H90	0,058	11,05	4,504E-04	A	22,6
Umbria-Marche	14/10/1997	5,7	R1315NS	0,372	12,58	4,120E-04	C	
Umbria-Marche	26/09/1997	6	R1187NS	0,561	13,04	3,924E-04	C	
Friuli	15/09/1976	6	BRE_XA	0,033	21,82	3,783E-04	A	
Umbria-Marche	26/09/1997	6	R1204NS	0,003	11,58	3,284E-04	A	
Sicilia Sud Orientale 1990	13/12/1990		SORTWE	0,004	11,67	2,966E-04	C	
Lazio-Abruzzo 1984	11/05/1984		VILBARNNS	0,008	22,14	2,585E-04	A	
Lazio-Abruzzo 1984	11/05/1984		VILBARWE	0,288	23,75	2,354E-04	A	
Friuli	15/09/1976	6	TARCENS	0,006	27,90	2,198E-04	A	
Umbria-Marche	14/10/1997	5,7	R1301EW	0,041	19,95	1,962E-05	A	
Umbria-Marche	26/09/1997	6	R1193NS	0,033	10,53	9,810E-06	A	
Umbria-Marche	26/09/1997	6	R1204EW	0,097	14,95	5,358E-03	A	
Friuli	15/09/1976	6	TARCEWE	0,077	23,72	3,696E-03	A	
Umbria-Marche	14/10/1997	5,7	R1301NS	0,278	22,74	1,030E-03	A	
Umbria-Marche	26/09/1997	6	R1193EW	0,040	13,85	6,767E-04	A	
Umbria-Marche	26/09/1997	6	R1202EW	0,142	11,04	4,022E-04	A	
Basso Tirreno 1978	15/04/1978		MILAZWE	0,025	15,48	3,962E-04	B	
Umbria-Marche	14/10/1997	5,7	R1317NS	0,186	22,32	3,728E-04	A	
Umbria-Marche	14/10/1997	5,7	R1317EW	0,238	21,25	3,139E-04	A	

Umbria-Marche	26/09/1997	6	R1202NS	0,233	14,43	2,747E-04	A
Basso Tirreno 1978	15/04/1978		MILAZNS	0,130	15,97	2,354E-04	B
Umbria-Marche	14/10/1997	5,7	R1561EW	0,111	21,88	2,158E-04	C
Umbria-Marche	26/09/1997	6	R1183NS	0,135	30,35	1,962E-04	A
Umbria-Marche	26/09/1997	6	R1183EW	0,084	25,52	1,766E-04	A
Umbria-Marche	14/10/1997	5,7	R1652NS	0,047	41,44	1,373E-04	A
Umbria-Marche	14/10/1997	5,7	R1652EW	0,076	41,98	1,177E-04	A
Umbria-Marche	14/10/1997	5,7	R1313NS	0,045	22,98	1,079E-04	A
Umbria-Marche	14/10/1997	5,7	R1313EW	0,117	42,74	6,867E-05	A
Umbria-Marche	26/09/1997	5,7	R1188NS	0,100	27,03	5,886E-05	A
Umbria-Marche	26/09/1997	5,7	R1188EW	0,049	28,94	5,886E-05	A
Umbria-Marche	26/09/1997	6	R1189NS	0,075	19,66	4,905E-05	A
Umbria-Marche	26/09/1997	6	R1189EW	0,086	17,17	4,905E-05	A
Umbria-Marche	26/09/1997	6	R1192NS	0,059	26,94	3,924E-05	A
Umbria-Marche	26/09/1997	6	R1192EW	0,044	27,94	9,810E-06	A
Umbria-Marche	14/10/1997	5,7	R1561NS	0,034	26,13	0,000E+00	C

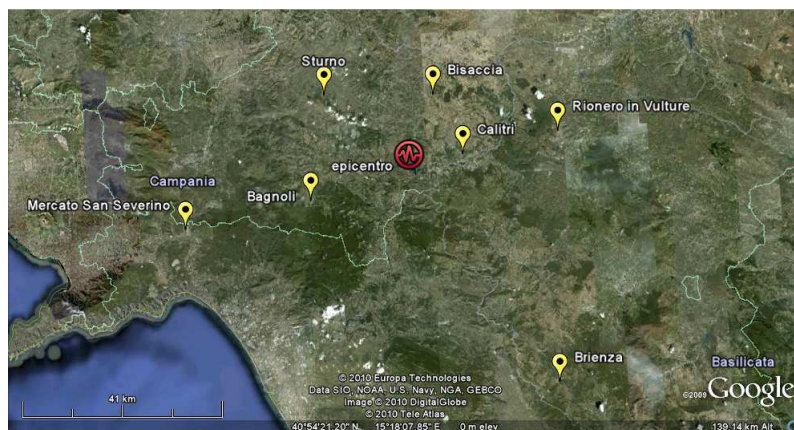


Figura 7.5. Stazioni accelerometriche del terremoto dell'Irpinia del 23 novembre 2009

7.2.4 Importanza della densità delle stazioni di registrazione

Sono stati presi in esame i terremoti principali italiani dagli anni in cui sono disponibili le registrazioni accelerometriche (sito ITACA) e sono stati ricavati i valori del Potenziale Distruttivo massimo registrato per ogni evento.

In tabella 7.3 sono riportati in modo schematico il nome dell'evento, la data, il numero di stazioni che hanno registrato l'evento, il potenziale distruttivo massimo e il codice e l'anno di installazione della stazione che ha registrato l'accelerogramma dal quale è stato ricavato il valore del P_D ; nella figura 7.6 è illustrato l'andamento del P_D nel tempo, considerando il succedersi dei maggiori eventi sismici riportati in tabella 7.3 mentre nella figura 7.7 è riportata la numerosità delle stazioni che hanno registrato gli eventi sismici in considerazione.

Tabella 7.3. Valori del P_D dei principali terremoti italiani a partire dal 1976 (fonte: INGV)

evento	data	numero stazioni	P_D ($g \cdot s^3 \cdot 10^{-4}$)	stazione	anno di installazione
Friuli '76	06/05/1976	10	2,13	TLM	1973
Basso Tirreno '78	15/04/1978	5	0,38	PTT1	1976
Norcia '79	19/09/1979	8	0,08	CSC	1974
Irpinia '80	23/11/1980	21	6,53	CLT	1975
Umbria '84	29/04/1984	7	0,19	PTL	1974
Lazio-Abruzzo '84	11/05/1984	10	0,03	VLB	1984
Sicilia Sud Orientale '90	13/12/1990	7	0,32	CAT	1990
Umbria-Marche '97	26/09/1997	20	1,14	NCR	1974
Massiccio Ortles '01	17/07/2001	1	0,01	SLP	1994
Southern Tyrrhenian '02	06/09/2002	4	0,01	PTTO	2000
Molise '02	31/10/2002	12	0,06	SSV	1975
Oltrepo' Pavese '03	11/04/2003	1	0,08	TRT	1976
L'Aquila '09	06/04/2009	57	15,00	AQM	1997

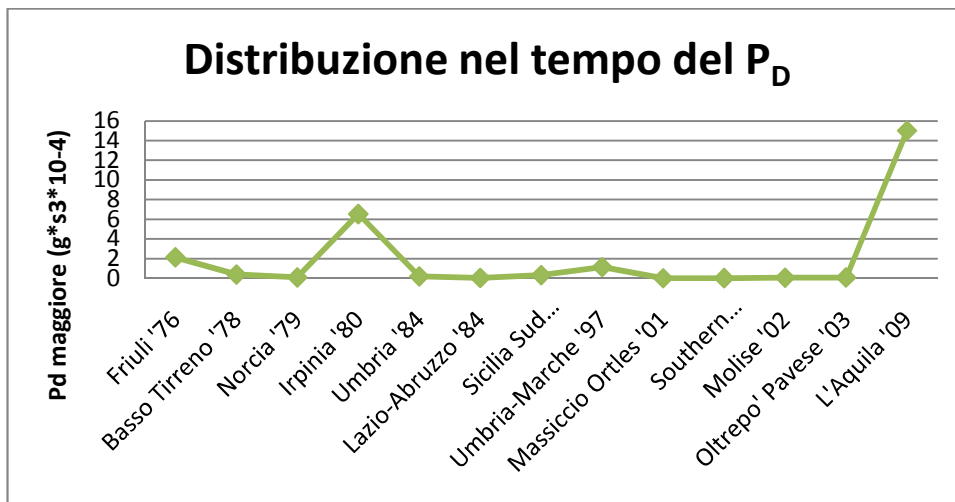


Figura 7.6. Valori del P_D nel tempo considerando i maggiori eventi sismici italiani degli ultimi anni

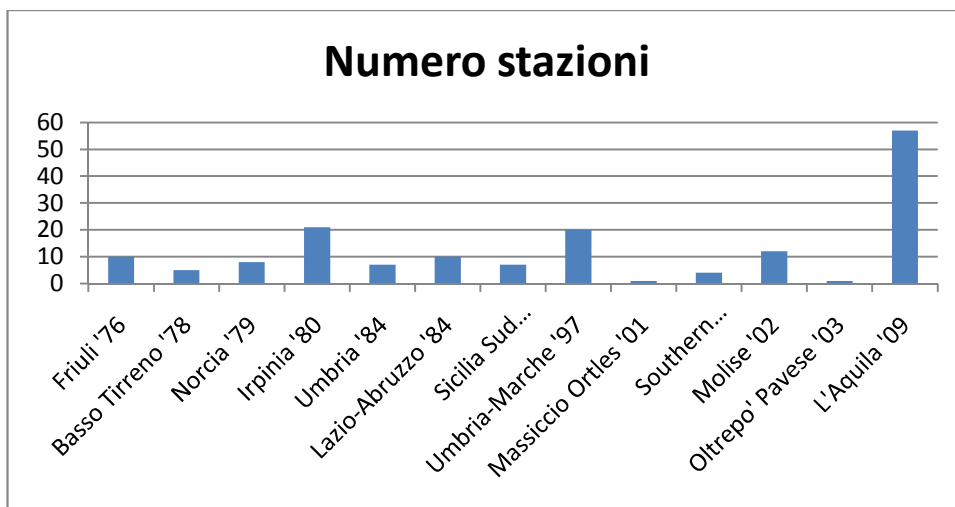


Figura 7.7. Numero delle stazioni che hanno registrato gli eventi sismici in considerazione

Osservando le figure 7.6 e 7.7 si nota un andamento simile del potenziale distruttivo e del numero di stazioni accelerometriche (si faccia particolare attenzione al terremoto dell'Irpinia 1976, Umbria-Marche 1997 e de L'Aquila 2009); ciò conferma l'importanza della densità della rete accelerometrica per una miglior stima del P_D . In generale il valore del potenziale distruttivo è tanto maggiore quanto si è prossimi alla faglia quindi la presenza di un maggior numero di registrazioni prossime alla faglia porta ad un valore del P_D più elevato.

7.3 Intensità di Arias (I_A)

Spesso si utilizzano altri parametri per caratterizzare il potenziale di danno del moto del suolo, come ad esempio l'accelerazione di picco (PGA) o l'intensità di Arias (I_A).

L'equazione 7.2 precedentemente presentata definisce l'intensità di Arias.

E' utile notare che, sulla base di un teorema legato alla trasformata di Fourier (teorema di Parseval), l'intensità di Arias è uguale, a meno di un fattore di scala, all'area sottesa dallo spettro di Fourier dell'accelerogramma, elevato al quadrato; dimensionalmente l'intensità di Arias risulta una velocità.

Dato che in Italia si considera maggiormente l' I_A rispetto al P_D , risulta opportuno presentare un'analisi dei valori delle Intensità di Arias per i terremoti italiani analizzati in precedenza. E' per questo che in tabella 7.2 si è scelto di riportare anche i valori dell' I_A per i terremoti italiani più rappresentativi degli ultimi anni.

Si noti che le registrazioni del terremoto de L'Aquila del 2009 non occupano le stesse posizioni nelle tabelle se si ordinano le stazioni in base al valore del Potenziale Distruttivo o dell'Intensità di Arias; ciò significa che almeno uno dei due parametri considerati non rappresenta l'entità del danno; l'Intensità di Arias rappresenta la risposta elastica, non si relaziona al danno soprattutto per livelli di danno elevati, mentre il Potenziale Distruttivo è relazionato al danno geotecnico (Saragoni, 1989).

Nel seguente paragrafo (7.4) si mettono a confronto diversi parametri considerati rappresentativi del danno.

7.4 Comparazione tra diverse grandezze rappresentative del danno

Sulla base di numerose registrazioni accelerometriche diversi autori hanno proposto differenti parametri per esprimere, di solito attraverso semplici indici, la severità od il potenziale di danneggiamento dei terremoti. La definizione di tali parametri può richiedere la stima di valori strumentali di picco; l'integrazione delle registrazioni nel dominio del tempo; la valutazione del contenuto in frequenze mediante la trasformata di Fourier, o delle frequenze caratteristiche mediante il metodo dell'attraversamento dello zero; l'integrazione parametrica dell'equazione del moto di un sistema a un grado di libertà e la successiva analisi dei risultati; l'integrazione parametrica dell'equazione del moto di un

sistema a un grado di libertà e l'integrazione nel dominio delle frequenze dei risultati intermedi; possono inoltre essere definiti parametri che combinano i risultati derivati dalle tecniche suddette.

In questo paragrafo si presentano alcuni dei parametri utilizzati per identificare il potenziale di danneggiamento di un evento sismico in un dato sito, in particolare: il potenziale distruttivo (P_D), già presentato nel paragrafo 7.2, l'intensità di Arias (I_A), presentato nel paragrafo 7.3, l'accelerazione massima del suolo (PGA) e l'intensità spettrale di Housner ($SI(\xi)$).

L'accelerazione di picco del terreno (PGA) è il parametro erroneamente considerato come uno dei fattori principali direttamente responsabili del danneggiamento delle strutture; è inoltre quello maggiormente utilizzato nelle applicazioni ingegneristiche, essendo l'accelerazione direttamente proporzionale alle forze di inerzia agenti sulle strutture. Tuttavia esso si rivela di scarsa efficacia, essendo associato ad un breve impulso di frequenza molto elevata, al di fuori del campo di frequenze naturali della maggior parte delle strutture: in questo caso, la maggior parte dell'impulso viene assorbita dall'inerzia della struttura con piccole deformazioni. Ad esempio la registrazione Rocca ns, in occasione del terremoto di Ancona del 14 giugno 1971 ($M_L=4,7$, $D_f=7,0$ km), fornisce un elevato valore di PGA ($716,24 \text{ cm/s}^2$), pur evidenziando un basso potere distruttivo. Un'accelerazione più moderata può invece essere associata a un impulso a bassa frequenza di lunga durata, il cui risultato è una deformazione significativa della struttura. Inoltre il PGA può essere distorto dalla presenza di irregolarità superficiali locali della topografia, o da altri fattori quali l'interazione con la risposta di grandi strutture vicine. La velocità di picco del terreno (PGV) fornisce un miglior approccio alla definizione del potere distruttivo dei terremoti (Mollaioli, 1996).

Il coefficiente SI (Intensità spettrale di Housner) proposto da Housner è definito dall'area racchiusa dallo spettro delle pseudo velocità, per uno smorzamento del 5%, nell'intervallo di periodi 0,1-2,5 secondi.

$$SI(\xi) = \int_{0,1}^{2,5} S_{pv}(\xi, T) dT \quad \text{eq.7.4}$$

Il difetto maggiore di questo parametro consiste nel fatto che non consente di tenere conto della durata effettiva del moto del suolo. Per porre SI in relazione con S_{pa} , la precedente equazione può essere riscritta

$$SI(\xi) = \int_{0,1}^{2,5} S_{pv}(\xi, T) dT = \frac{1}{2\pi} \int_{0,1}^{2,5} S_{pa}(\xi, T) T dT \quad \text{eq. 7.5}$$

Che rappresenta il momento statico dell'area di S_{pa} , per T compreso tra 0,1 e 2,5 secondi, intorno all'asse S_{pa} . Quindi la precedente equazione implica che SI è più grande per terremoti con una significativa quantità di basse frequenze (o lunghi periodi), e permette di chiarire il motivo per cui l'evento del Messico 1985 presenti il valore più elevato di SI, sebbene S_{pa} risulti non particolarmente alto.

Altri parametri proposti per valutare la distruttività possono essere: l'accelerazione effettiva di picco (EPA), la velocità effettiva di picco (EPV), il criterio energetico di Housner (E_v), l'indice di Fajfar (I_f).

Studi realizzati da Uang e Bertero (1988) hanno mostrato che tra il potenziale distruttivo del moto del suolo e i diversi parametri proposti esiste, in genere, una debole correlazione. Inoltre tra i diversi parametri esistono notevoli differenze. Decanini, Gavarini e Mollaioli (1993) hanno esteso l'analisi, includendo

terremoti italiani, della correlazione tra danneggiamento e i diversi indici proposti, ottenendo risultati concordi con quelli di Uang e Bertero.

In figura 7.8 si mostrano i quattro parametri rappresentativi del danno sismico presentati precedentemente, normalizzati al valore massimo di ognuno, per 6 accelerogrammi rappresentativi; sull'asse X sono state ordinate le registrazioni in modo qualitativo da Bertero, secondo un livello di danno relativo che è stato osservato da lui; l'aspetto importante è che lui ha visitato tutti i terremoti presi in considerazione, da ciò deriva l'importanza del grafico. Da questo grafico si può osservare quanto ogni parametro rappresenti il grado di danno. I sei terremoti presi in considerazione sono: Mexico 1985, Chile 1985, Miyagi- Ken Oki 1978, San Salvador 1986, El Centro 1940 e Taft 1952.

Si osservi che l'unico parametro che decresce al decrescere dell'intensità macrosismica è il Potenziale Distruttivo (P_D); l'Intensità di Arias si mostra abbastanza coerente solo per livelli di danno bassi (in questo caso gli ultimi tre terremoti), mentre per danni elevati oscilla tra valori di differente portata; l'Accelerazione di Picco e l'Intensità spettrale di Housner si comportano incoerentemente sia per valori di danno alti che bassi.

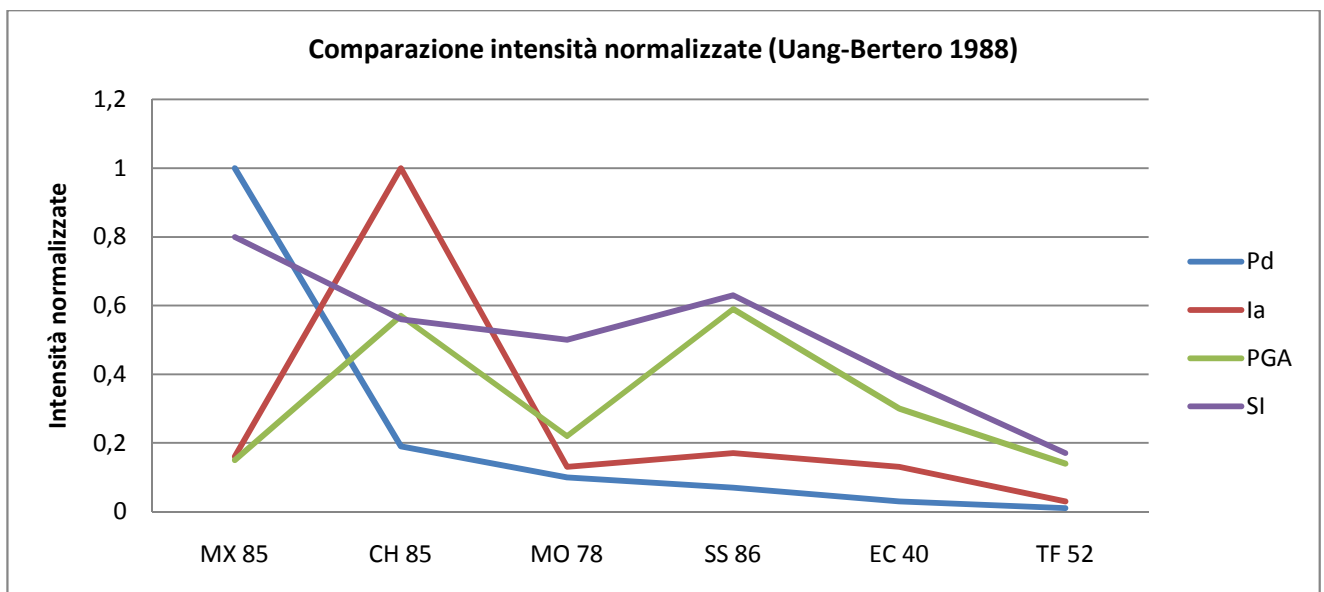


Figura 7.8. Confronto dell'andamento di diversi parametri rappresentativi del danno sismico; i valori sono stati normalizzati. Sull'asse delle ascisse vi sono i codici di 6 eventi posti in ordine decrescente secondo il livello di danno osservato da Bertero direttamente in sito. (Le componenti delle registrazioni prese in considerazione sono: CH:(3 marzo, 1985) Lolloo ,componente N10°E; EC:(18 maggio 1940) El Centro,componente NS; MX:(19 settembre 1985) SCT, componente EW; SS:(10 ottobre 1986) CIG, componente EW; TF:(21 luglio 1952) Taft, componente N21°E; MO:(12 giugno 1978)Tohoku Sendai City,componente NS)

In figura 7.9 è riportato un grafico di confronto delle grandezze rappresentative del danno per le registrazioni del terremoto de L'Aquila.

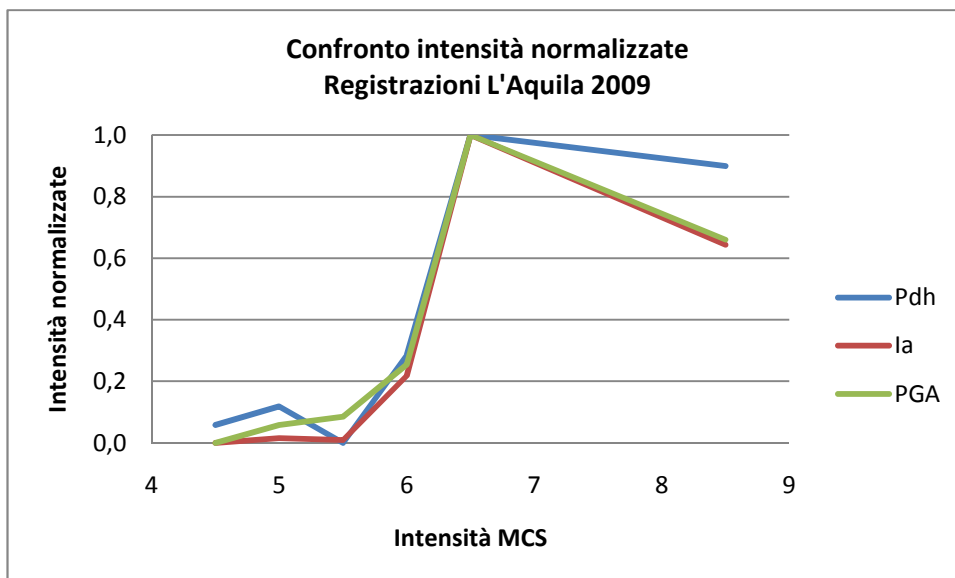


Figura 7.9. Confronto delle grandezze rappresentative del danno (Potenziale di Distruttività orizzontale, intensità di Arias e accelerazione massima)

Si è scelto di fare la media tra i Pdh delle registrazioni ottenute nei luoghi aventi la stessa intensità macrosismica (così anche per l'Ia e il PGA) per poter così valutare un valore teorico del potenziale di distruttività da attribuire alla intensità di danno in considerazione per il terremoto de L'Aquila (i valori di Pdh, Ia e PGA, per ogni singola stazione di registrazione dell'aquilano, si trovano in tabella 7.1).

In figura 7.9 si nota che per intensità 8-9 la curva si abbassa molto, ciò potrebbe essere giustificato dal fatto che la stazione AQK, che si trova a L'Aquila, non è posta nel centro della città dove è stato attribuita questa intensità macrosismica, bensì fuori dalla cerchia storica ai piedi della collina, in un luogo che ha presentato un livello di danno inferiore; inoltre si tratta di una registrazione che presenta un contenuto più marcato di basse frequenze.

In questo caso l'andamento dei tre indici è confrontabile; il PGA sembrerebbe essere il più coerente con l'aumento dell'intensità macrosismica, soprattutto per intensità MCS < 5,5, forse poiché è indicativo del danno per entità di questo minori.

7.5 Conclusioni

Ponendo in correlazione i valori del parametro P_{DH} calcolati ed i valori dell'intensità macrosismica MCS si osserva che, ad esclusione del dato riguardante la stazione AQK, l'andamento è ben raffigurato dalla curva di Araya e Saragoni (1984) (figura 7.2). E' stata discussa l'ubicazione della stazione AQK rispetto al centro storico, al quale si fa riferimento per stabilire il valore dell'intensità macrosismica, e il valore di intensità macrosismica attribuito alla città de L'Aquila; concludendo che probabilmente risulta più coerente con le osservazioni fatte nel paragrafo 5.2.3 e 7.2.2 attribuire una intensità 7. Con questo nuovo valore anche il

punto riguardante la stazione AQK si comporta coerentemente con l'andamento generale stabilito da Araya e Saragoni (figura 7.2).

I valori del Potenziale Distruttivo del terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009 sono stati confrontati con quelli dei maggiori terremoti italiani e si è notato che le registrazioni dell'aquilano si trovano ai primi posti per tutti e tre i tipi di suolo (tabella 7.2).

In seguito ad un confronto tra l'andamento di differenti parametri rappresentativi del danno ed il valore dell'intensità macrosismica si osserva che la grandezza che sembra descrivere meglio i danni è il P_{DH} di Araya e Saragoni poiché tiene in considerazione l'ampiezza, la durata e il contenuto in frequenza degli accelerogrammi dei terremoti (figura 7.8).

In tutte le località in cui sono ubicate le stazioni non si sono mostrati dei livelli di danni elevati (Intensità Macrosismica massima 6,5 ad esclusione della AQK che ha una Intensità Macrosismica 9, valore ampiamente discusso) infatti il potenziale distruttivo non ha dei valori esageratamente elevati nonostante le accelerazioni di picco siano tra 0,3 g e 1,17 g (PGA della stazione AQM eliminato dalla Protezione Civile) per le stazioni ubicate sulla proiezione di faglia in superficie, ciò è stato verificato probabilmente a causa della presenza delle asperità che portano ad un aumento del valore d'accelerazione e contemporaneamente ad un aumento di v_0 .

Per una buona stima del P_D è importante che la rete accelerometrica sia densa, in generale il valore del potenziale distruttivo è tanto maggiore quanto si è prossimi alla faglia quindi la presenza di un maggior numero di registrazioni prossime alla faglia porta ad un valore del P_D più elevato; non è da escludere che in futuro si otterranno registrazioni con valori di P_D elevati, grazie alla nuova rete strumentale italiana molto densa che aumenterà la probabilità di registrare una scossa molto vicino alla faglia e specialmente alle sue asperità.

8 Terremoto del Cile del 27 febbraio 2010

8.1 Introduzione

Si presentano le caratteristiche principali del terremoto del sud del Cile del 27 febbraio 2010, del quale si è avuta la possibilità di vivere in prima persona la forte scossa e di osservare i danni a Santiago e in diverse città ubicate nella zona epicentrale.

Ad oggi non vi sono ancora disponibili tutte le registrazioni accelerometriche poiché la rete era formata da strumenti analogici ed il tempo per la digitalizzazione è lungo.

Nel presente capitolo si discutono i danni osservati e si confrontano le caratteristiche del terremoto del Cile con quello italiano de L'Aquila del 6 aprile 2009 e con quello cileno del 3 marzo 1985.

8.2 Presentazione del terremoto del Cile del 27 febbraio 2010

Il 27 febbraio 2010 alle 03:34 a.m. (ora locale) un grande terremoto di magnitudo 8,8 (Mw) ha colpito la zona centrale del Cile di estensione di circa 450 km di longitudine in direzione praticamente nord-sud e di 150 km di larghezza, con uno spostamento di circa 10 m. L'epicentro si trova ad una profondità di 35 km, con coordinate 35,909°S e 72,733°W, localizzato nella regione del Bio-Bio.

L'origine è dovuta al movimento della placca di Nazca sotto la placca Sudamericana (figura 8.1) in un'area che si estende approssimativamente dalla penisola di Arauco verso sud fino al nord di Pichilemu. L'espressione superficiale della zona di contatto tra le due placche è la fossa che si trova a circa 130 km dalla costa verso ovest. La convergenza tra queste due placche è la responsabile dell'avvenimento dei grandi terremoti di subduzione in Cile; la velocità di convergenza tra la placca di Nazca e quella sudamericana di fronte al Cile varia tra 6,5 e 7 cm/anno.

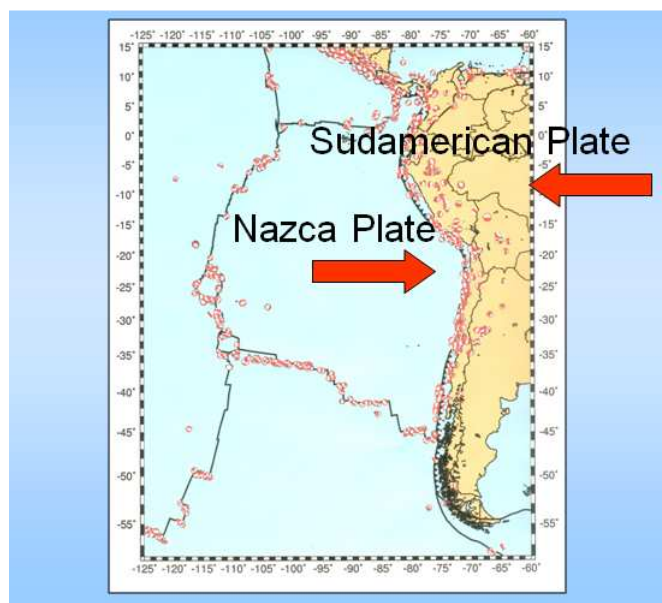


Figura 8.1. Movimento di subduzione della placca di Nazca sotto la placca Sudamericana

La costa cilena ha una storia con molti terremoti forti: dal 1973 ci sono stati 13 eventi con magnitudo maggiore di 7. La scossa del 27 febbraio 2010 è stata originata a circa 230 km a nord della regione in cui è avvenuto il terremoto del maggio 1960 con magnitudo 9,5, il terremoto maggiore a livello mondiale dall'inizio dell'utilizzo di strumenti sismologici all'inizio del XX secolo. 300 km a nord rispetto all'epicentro del terremoto del 27 febbraio si trova la regione origine del terremoto del 17 agosto 1906 con magnitudo 8,2; circa 870 km a nord c'è la zona del terremoto del novembre del 1922 di magnitudo 8,5. Il sisma del 27 febbraio 2010 ha interessato la zona di subduzione sudamericana separando le zone colpite dai terremoti del 1960 e 1906 (figura 8.2).

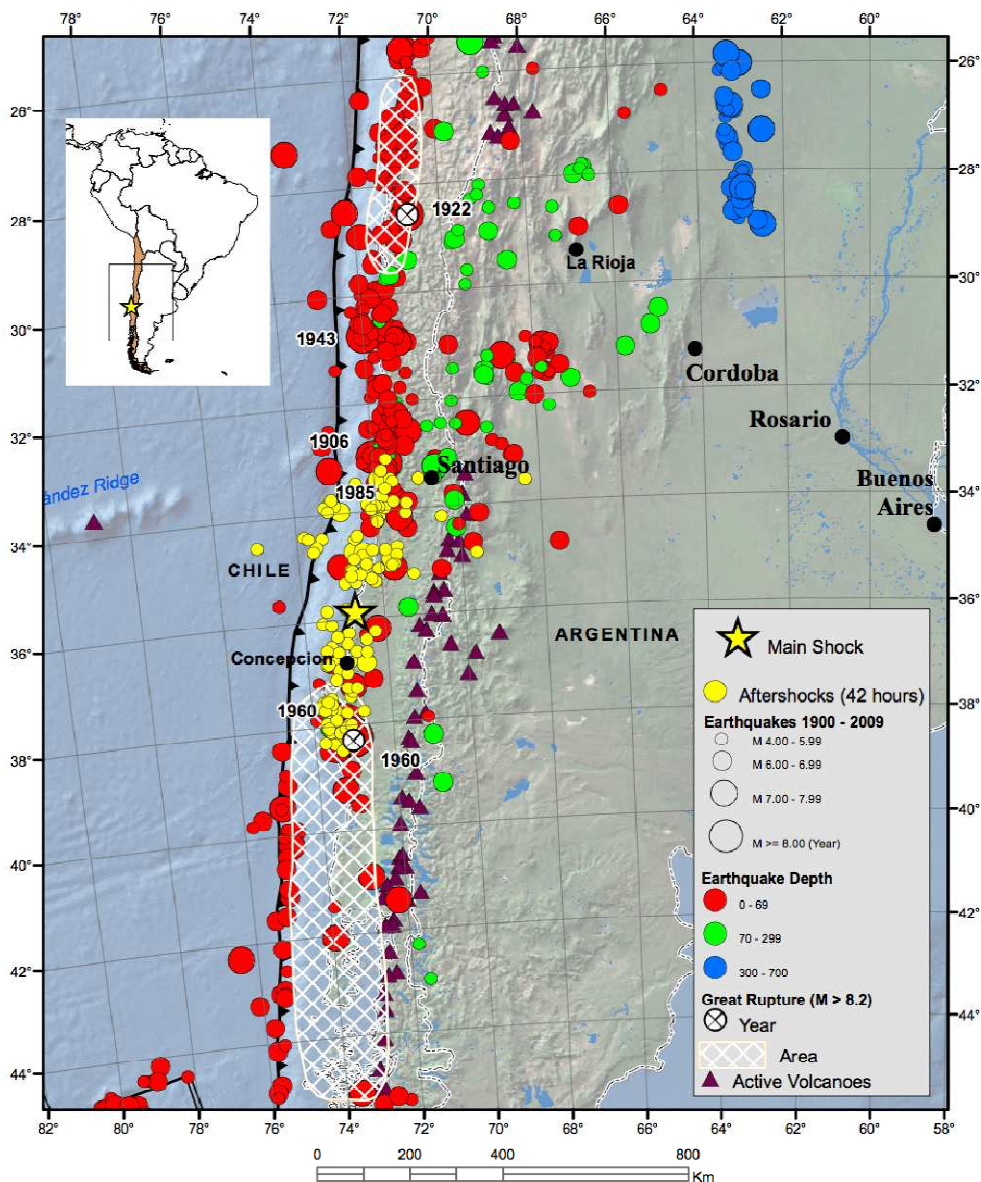


Figura 8.2. Ubicazione della zona epicentrale del terremoto del 27 febbraio 2010 e delle regioni colpite dai principali terremoti passati; USGS

Dopo l'avvenimento di qualsiasi sisma nella zona di subduzione avvengono numerose repliche; è un processo naturale poiché il campo di tensioni interne nelle placche e nella zona di contatto si è alterato considerevolmente. In questo caso le repliche stanno ancora avvenendo, dal giorno della scossa principale la magnitudo e la frequenza sono diminuite e seguiranno diminuendo. Non si è presentata una scossa della stessa portata della principale, ciò non è possibile in quanto per permettere un movimento della faglia tra i 10 e 12 m, come avvenuto il 27 febbraio, è necessaria l'accumulazione di energia elastica durante decine di anni poiché il tasso di convergenza è dell'ordine di 6,7 cm/anno.

La figura 8.3 mostra la distribuzione temporale delle repliche di magnitudo 4,8 o superiore durante le prime tre settimane dopo il terremoto, per quanto riguarda la magnitudo ed il numero di eventi al giorno. Si noti il gran numero di repliche con magnitudo maggiore di 4,7 avvenute durante i primi tre giorni. Durante le prime tre settimane sono state registrate più di 260 repliche con magnitudo superiore a 5 e 18 con magnitudo uguale o superiore a 6. Sono state registrate diverse migliaia di repliche di magnitudo minore, in generale non percepite dalla popolazione. (I dati riguardanti le magnitudo sono stati stabiliti dal Centro Nacional de Informacion Sismica (NEIC) del Servicio Geologico degli Stati Uniti (USGS)).

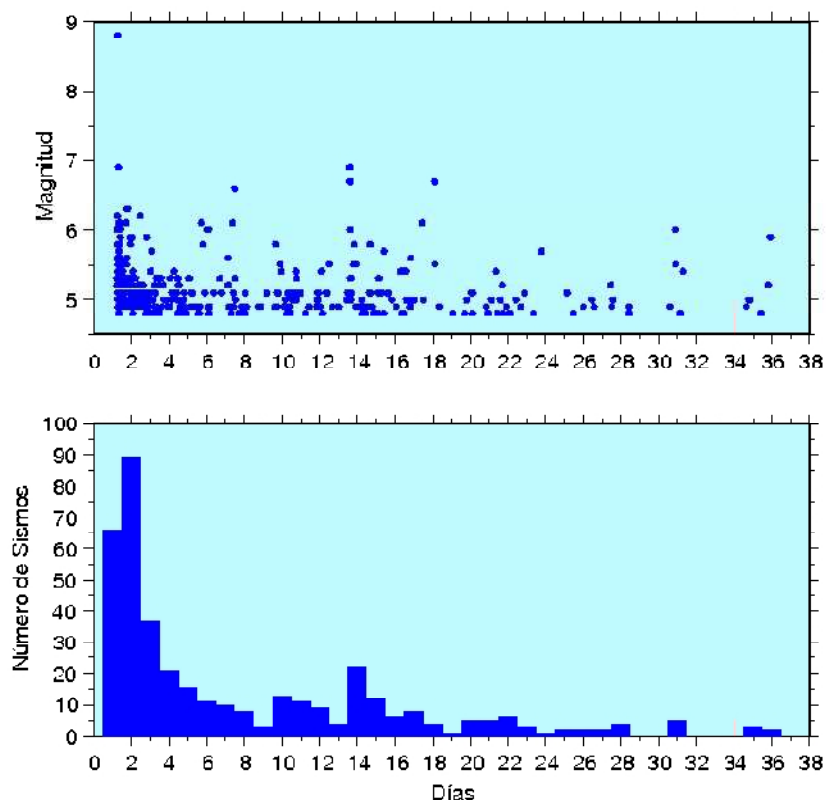


Figura 8.3. Distribuzione temporale delle repliche in funzione della magnitudo (solamente gli eventi con magnitudo superiore a 4,7; riquadro superiore) e numero di scosse al giorno che sono state registrate fino al 36° giorno dopo l'evento principale (fino al 3 aprile). I dati riguardanti le magnitudo sono stati stabiliti dal Centro Nacional de Informacion Sismica (NEIC) del Servicio Geologico degli Stati Uniti (USGS)

In figura 8.4 è illustrato il movimento co-sismico osservato come risultato della attivazione della faglia nel contatto tra la placca di Nazca e la placca Sudamericana. Il movimento orizzontale massimo raggiunge i 3,7

m nella città di Concepcion e i 4,7 m a Constitucion. Dall'avvenimento del terremoto e fino al 9 marzo si è registrato uno spostamento post-sismico di circa 50 cm nella città di Concepcion.

In figura 8.5 è rappresentata una prima approssimazione delle due principali asperità (di Concepcion e di Pichilemu) che caratterizzano la faglia del terremoto del 27 febbraio 2010, mentre nella figura 8.6 è riportato l'accelerogramma della stazione posta a Maipù a Santiago, in cui è evidente il movimento dovuto alla prima asperità, la vibrazione libera del suolo, e la presenza della seconda asperità.

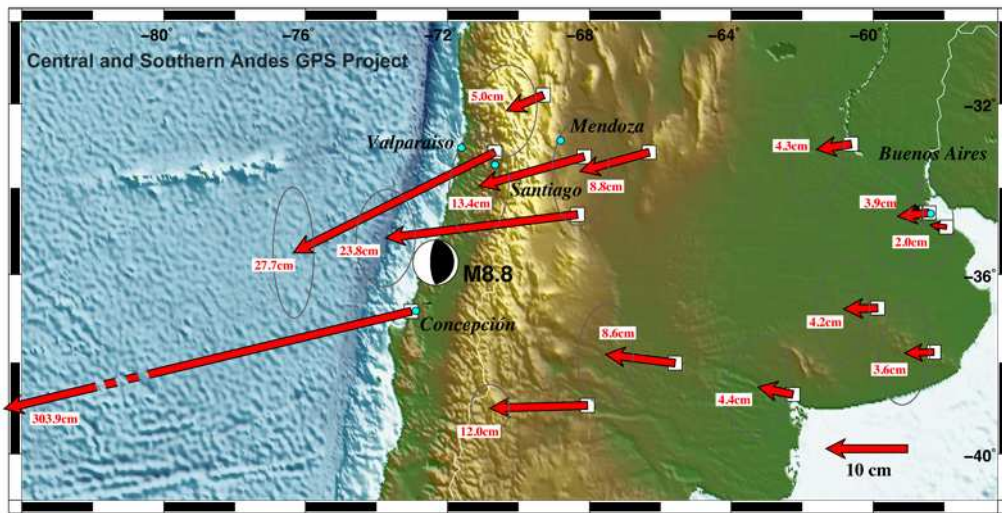


Figura 8.4. Movimento co-sismico della scossa principale del 27 febbraio 2010; USGS

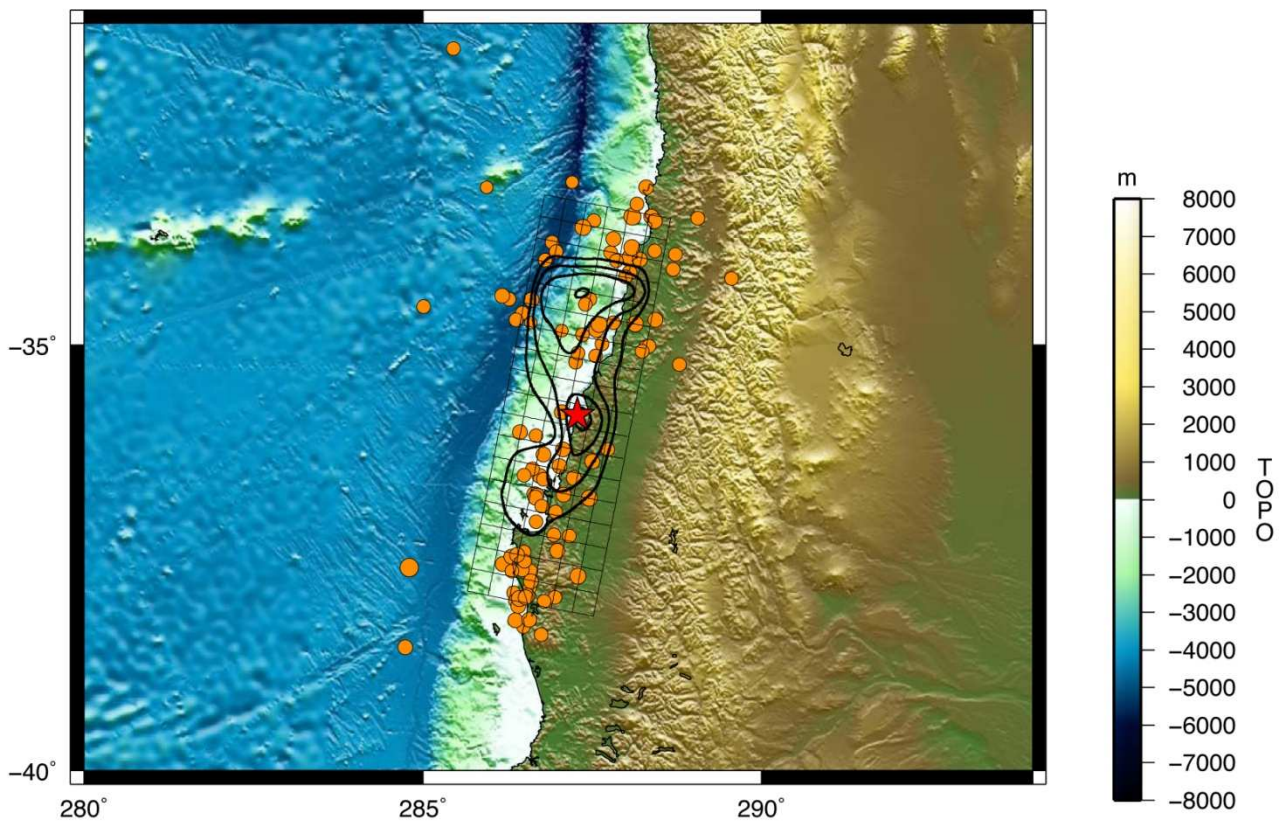


Figura 8.5. Rappresentazione preliminare della localizzazione delle due asperità appartenenti alla faglia. La stella rossa rappresenta l'epicentro della scossa principale; gentilmente fornita da R. Saragoni

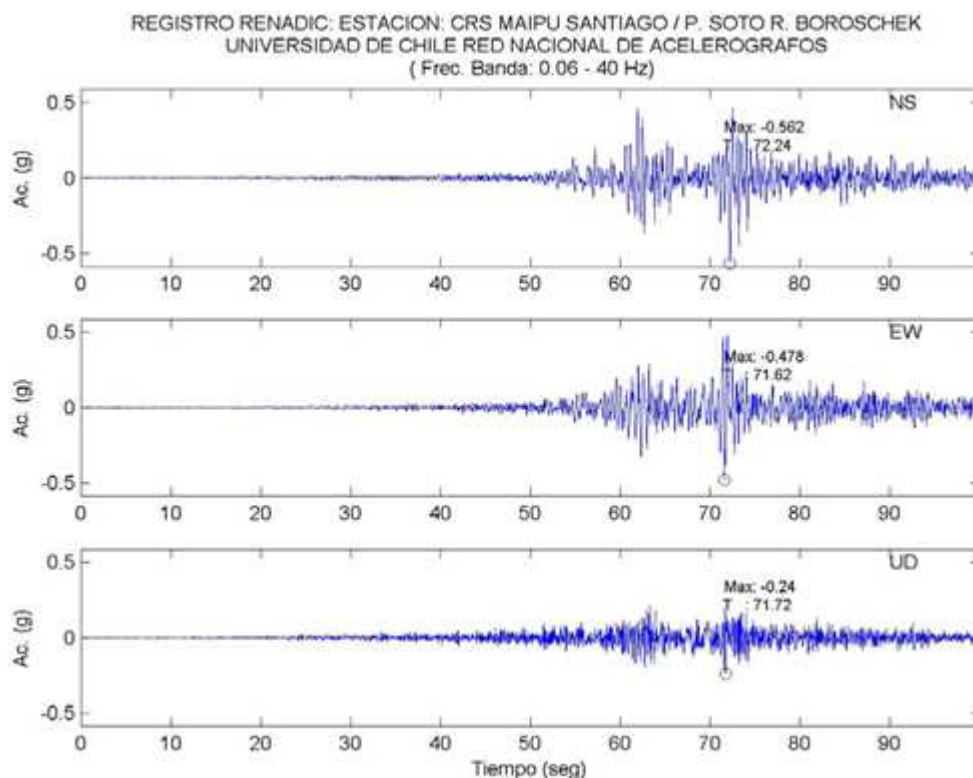


Figura 8.6. Accelerogramma della stazione di Maipù, Santiago; Renadic

Ad oggi sono disponibili i dati digitali di sole quattro stazioni poiché il passaggio dalle informazioni analogiche a quelle digitali richiede un lungo tempo. Nel presente lavoro si è scelto di riportare i valori delle accelerazioni massime delle 9 registrazioni analizzate finora (tabella 8.1) e l'accelerogramma ottenuto a Concepcion, città più prossima all'epicentro (figura 8.7). Dai grafici si è osservato che la durata del movimento è approssimativamente di 140 secondi mentre la fase forte di vibrazione è di 40, 50 secondi.

Tabella 8.1. Valori dell'accelerazione massima orizzontale e verticale (senza correzioni) riportati dalla Rete del Dipartimento di Ingegneria Civile della Università de Chile (www.renadic.cl) fino al 5 aprile

Localidad	Aceleración Máx. Horizontal	Aceleración Máx. Vertical
Depto. Ing. Civil, U. de Chile	0.17 g	0.14 g
Estación Metro Mirador	0.24 g	0.13 g
CRS Maipú, R.M.	0.56 g	0.24 g
Hospital Tisné, R.M.	0.30 g	0.28 g
Hospital Sótero del Río R.M.	0.27 g	0.13 g
Hospital de Curicó	0.47 g	0.20 g
Hospital de Valdivia	0.14 g	0.05 g
Viña del Mar (Marga Marga)	0.35 g	0.26 g
Viña del Mar (Centro)	0.33 g	0.19 g

Estación Colegio San Pedro, Concepción

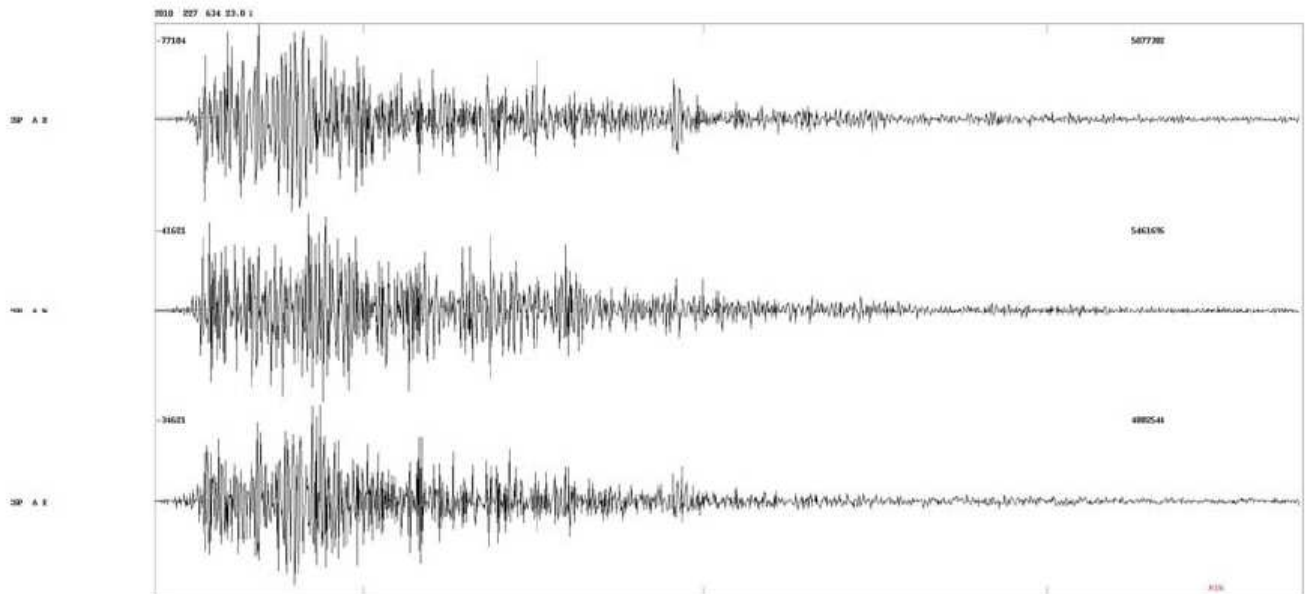


Figura 8.7. Accelerogrammi della stazione del Colegio San Pedro a Concepcion

8.3 Analisi dei dati: Spettri di risposta e Potenziale distruttivo

Nel presente paragrafo viene fatto un confronto tra gli spettri di risposta delle registrazioni epicentrali per il territorio aquilano e la registrazione per ora disponibile di Concepcion più vicina all'epicentro del terremoto del Cile e vengono discussi i valori del potenziale distruttivo delle tre stazioni poste a Concepcion, Santiago Colegio las Americas e El Roble (in figura 8.8 è indicata la loro ubicazione).

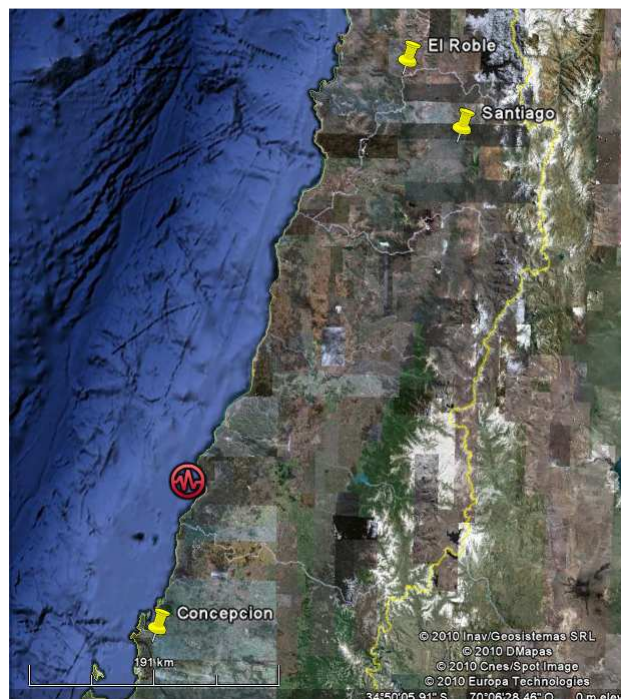


Figura 8.8. Ubicazione delle tre stazioni considerate, delle quali si hanno a disposizione le registrazioni (in data luglio 2010)

In tabella 8.2 viene riportato il valore dell'accelerazione spettrale maggiore per le sole tre componenti della registrazione di Concepcion, in tabella 8.3 sono presentati i valori dei periodi dell'impulso dalla faglia (Tf) e dei periodi del suolo (Ts), mentre in figura 8.9, 8.10 e 8.11 vengono riportati gli spettri di risposta rispettivamente in direzione ew, ns e vt con fattore di smorzamento $\xi=5\%$. Preme fare presente che i due picchi non necessariamente corrispondono al Tf ed al Ts, delle volte possono essere rappresentativi delle asperità presenti sul piano di faglia. Gli spettri di risposta non forniscono alcuna informazione riguardante la durata della scossa: si osserva che, ad eccezione della direzione verticale, i valori della registrazione di Concepcion non si discostano da quelli de L'Aquila, nonostante le durate dei due terremoti siano enormemente differenti.

Nel caso della registrazione di Concepcion si hanno i due picchi intorno al periodo di 0,15 s e 0,8 s, quindi le strutture che subiscono una maggiore accelerazione sono le case a 2 piani e gli edifici in cemento armato di 8-9 piani. A Concepcion vi sono prevalentemente case a 2 piani. Il secondo picco dello spettro di Concepcion è stato, tra le altre cose, il responsabile del danno agli edifici di Concepcion.

Confrontando gli spettri di risposta de L'Aquila e della stazione ubicata a Concepcion è possibile osservare che per le direzioni ew e ns l'andamento della registrazione cilena è confrontabile con quello della stazione AQM ad esclusione del secondo picco probabilmente corrispondente al periodo influenzato dalla tipologia del suolo; mentre per la componente verticale i valori di Concepcion si trovano a metà tra quelli della stazione AQM e le altre stazioni de L'Aquila, ciò probabilmente significa che la città di Concepcion ha subito una grande influenza dalla vicinanza della asperità presente sulla faglia però non si trova esattamente sopra la asperità come si è supposto per il caso della stazione AQM.

Tabella 8.2. Valore maggiore di accelerazione spettrale e corrispondente periodo per le tre registrazioni del terremoto del Cile

stazione	concepcion ew	concepcion ns	concepcion vt
acc max (g)	1,67	2,26	1,65
T (s)	0,193	0,193	0,132

Tabella 8.3. Valori dei periodi dell'impulso dalla faglia (Tf) e dei periodi del suolo (Ts) per le tre direzioni della stazione di Concepcion

stazione	concepcion ew	concepcion ns	concepcion vt
Tf	0,193	0,193	0,132
Ts	0,742	0,864	0,742

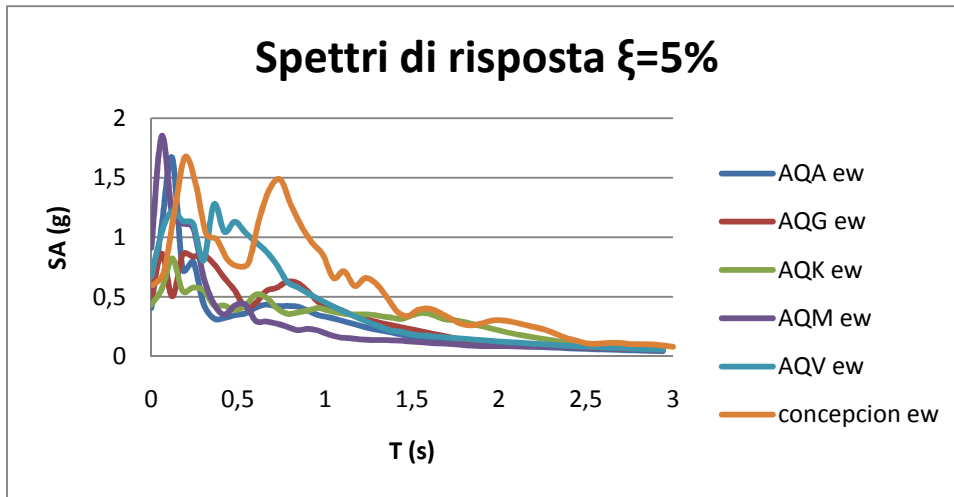


Figura 8.9. Spettri di risposta delle cinque stazioni più prossime all'epicentro del terremoto de L'Aquila e della stazione situata a Concepcion per il terremoto del Cile (direzione ew)

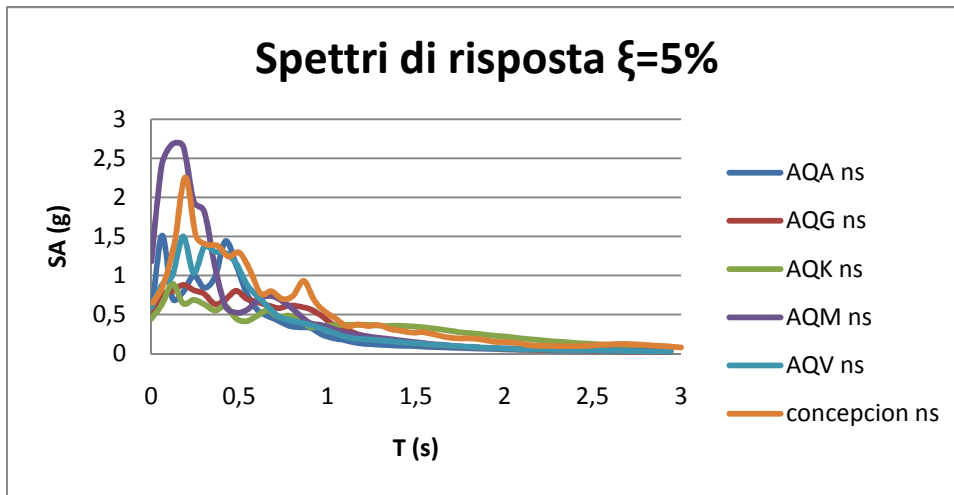


Figura 8.10. Spettri di risposta delle cinque stazioni più prossime all'epicentro del terremoto de L'Aquila e della stazione situata a Concepcion per il terremoto del Cile (direzione ns)

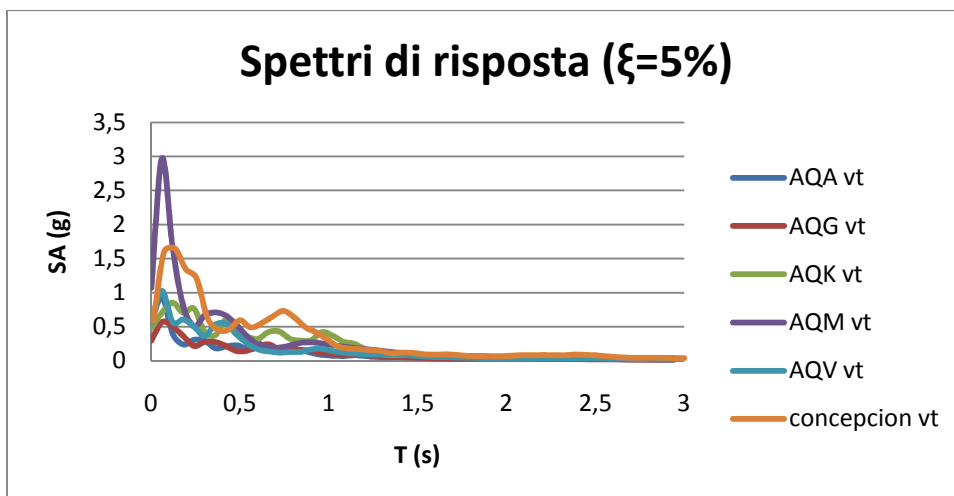


Figura 8.11. Spettri di risposta delle cinque stazioni più prossime all'epicentro del terremoto de L'Aquila e della stazione situata a Concepcion per il terremoto del Cile (direzione vt)

In tabella 8.4 sono riportati i valori del Potenziale Distruttivo registrato in tre stazioni accelerometriche del Cile, riferite al terremoto del 27 febbraio 2010, e delle stazioni più prossime all'epicentro nel caso del terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009. Tali valori sono stati riportati nel grafico in figura 8.12 con lo scopo di confrontare il potenziale distruttivo del caso aquilano con quello cileno.

Tabella 8.4. Valori dei Pdh per tre stazioni che hanno registrato il terremoto del 27 febbraio 2010 in Cile e delle registrazioni riguardanti il terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009

CILE	Intensità MSK	Pdh (m*s)	v0
Concepcion	7,5	0,29792	10,330
Stgo Colegio Las Americas	6,5	0,12446	7,495
el Roble	4	0,02384	10,840
L'AQUILA	Intensità MCS	Pdh (m*s)	v0
ANT	5	0,00118	4,881
AQA	6,5	0,00916	19,436
AQG	6,5	0,01295	14,643
AQK	8,5	0,01374	12,991
AQM	6,5	0,01961	17,079
AQV	6,5	0,02352	14,390
AVZ	5	0,00904	4,412
BOJ	4,5	0,00215	3,437
CDS	4,5	0,00062	3,466
CHT	5	0,00283	4,975
CLN	5,5	0,00028	16,660
CSO1	5	0,00048	5,297
FMG	5,5	0,00079	5,342
GSA	6	0,00471	13,396
GSG		0,00011	11,818
MTR	5	0,00083	10,390
ORC	5	0,00107	7,831
SUL	5	0,00042	6,802

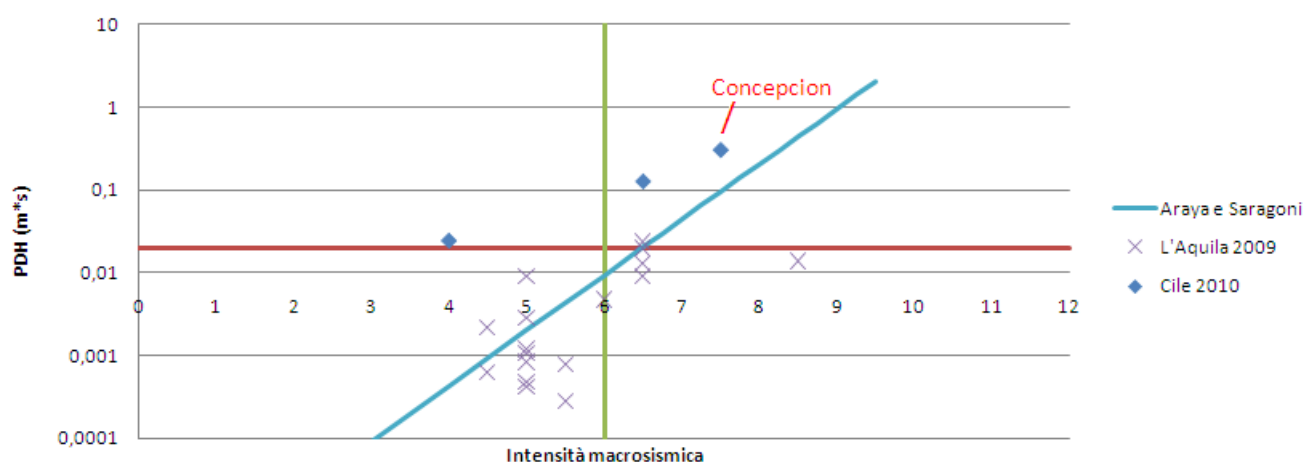


Figura 8.12. Confronto tra il potenziale distruttivo del terremoto del Cile (punti blu) con quello de L'Aquila (croci viola). La retta azzurra indica l'andamento generale studiato da Araya e Saragoni

Dalla figura 8.12 si nota che i valori riferiti al terremoto cileno presentano un Potenziale Distruttivo molto maggiore rispetto a quelli del sisma aquilano nonostante il livello del danno sia confrontabile per le stazioni prese in analisi; ciò potrebbe essere motivato dal fatto che nel caso delle registrazioni del Cile il numero delle intersezioni in un secondo dell'accelerogramma con l'asse dei tempi abbia valori minori (tabella 8.4), nonostante i livelli di accelerazione comparabili. Per il caso del Cile non si hanno registrazioni di terremoti aventi la sorgente sismica con le caratteristiche del terremoto de L'Aquila poiché le scosse simili a quelle de L'Aquila non sono state registrate (ad esempio Las Melosas 1985) e nel caso vi siano delle registrazioni, queste sono state ottenute lontane dall'epicentro e quindi in luoghi in cui si è verificata un'intensità macrosismica minore di 5.

Inoltre si nota che le registrazioni cilene riportate in figura 8.12 non sono coerenti con l'andamento suggerito da Araya e Saragoni, la ragione di ciò può riguardare la durata del movimento forte del terremoto del 27 febbraio, che è stata maggiore delle scosse anteriori considerate da Araya e Saragoni (ciò che porta ad aumentare il valore di I_a); inoltre il contenuto in bassa frequenza è maggiore per il terremoto del 2010 (ciò spiega perché i danni sono stati maggiori nelle strutture di periodi alti) e quindi presenta un numero di v_0 minore e quindi un P_d maggiore ed una intensità macrosismica minore (si ricordi che l'intensità rappresenta il danno nelle strutture rigide, come ad esempio le costruzioni in muratura o adobe di 1 e 2 piani, a partire dai quali si determina sia nel caso della scala MSK che la Mercalli Modificata; infatti durante la spedizione nella zona colpita dal terremoto del Cile 2010, sono stati valutati esclusivamente i danni alle costruzioni di 1 e 2 piani).

Il terremoto del 27 febbraio 2010 presenta caratteristiche differenti rispetto alle scosse cilene degli anni precedenti, ad esempio rispetto al terremoto di Santiago del 1985 (entrambi di subduzione), quindi ha caratteristiche particolari come ad esempio un valore di P_{dh} elevato in confronto ai valori delle intensità macrosismiche (commento personale del Prof. Maximiliano Astroza, Universidad de Chile). Si riportano di seguito casi puntuali che illustrano la diversità di alcune registrazioni del terremoto del 2010 e di altre scosse degli anni precedenti:

- a. Registrazioni del terremoto del 27 febbraio molto simili a quelle ottenute nello stesso luogo nel 1985 (ad esempio a Melipilla) ma il sisma più recente ha prodotto danni minori nelle costruzioni di 1 e 2 piani in adobe e muratura, quindi è stata stimata un'intensità macrosismica minore.
- b. Danni maggiori dei precedenti negli edifici alti, accelerazioni massime registrate comparabili; un esempio può essere il PGA registrato nella Escuela de Ingenieria della Universidad de Chile durante il terremoto del 27 febbraio 2010 e quello di Papudo 1971, entrambi compresi tra 0,15 e 0,20 g.
- c. La durata del movimento forte nel caso del terremoto del 2010 è maggiore, come detto in precedenza. Questa variabile sembrerebbe influenzare maggiormente sui danni agli edifici flessibili (edifici alti), anche per quelli più lontani dall'epicentro, e sul collasso o sul danno severo delle costruzioni rigide con un comportamento fragile (grandi danni nell'adobe, muratura senza rinforzi e

costruzioni di 3 o 4 piani di muratura rinforzata aventi problemi nella progettazione, ad esempio quelli osservati personalmente a Constitucion, Santa Cruz e Rancagua).

In seguito a queste osservazioni si è notato che l'andamento generale della correlazione di Araya e Saragoni ha delle limitazioni nel caso di terremoti del tipo di quello del 27 febbraio 2010 a causa della particolare durata del movimento forte e della frequenza delle onde che controllano la risposta registrata, caratteristiche dovute alla sorgente che produce il terremoto.

8.4 Alcuni confronti tra il terremoto del 2010 e quello del 3 marzo 1985

Il 3 marzo 1985, alle ore 6.47 p.m. ora locale, un terremoto di magnitudo da onde superficiali 7,8, ha colpito la zona a circa 125 km a ovest di Santiago vicino a Valparaiso e Vina del Mar.

Vi sono state almeno 177 vittime, 2.575 feriti, sono state distrutte 45.000 case, 76.000 gravemente danneggiate e 372.000 persone sono rimaste senza casa nella parte centrale del Cile (da La Serena ad Osorno), incluse le città di San Antonio, Valparaiso, Vina del Mar, Santiago e Rancagua. La massima intensità di danno rilevata è stata di grado VIII (scala Mercalli Modificata) a Valparaiso (in figura 8.13 è riportata la mappa delle intensità).

Si sono verificate migliaia di repliche, alcune delle quali hanno provocato ulteriori danni; l'8 aprile è avvenuta una replica di magnitudo 7,5 a circa 75 km a sudovest di Santiago (fonte: USGS).

Non si sono presentati danni uniformi in tutti i tipi di costruzioni: la maggior parte delle costruzioni in adobe della zona epicentrale sono state danneggiate, molte delle quali con un collasso totale o parziale. Le abitazioni in legno generalmente hanno retto bene; le strutture in acciaio, poco diffuse, non hanno presentato danni consistenti. Danni alle industrie e ai ponti sono stati deboli e diffusi, sebbene si sono presentati numerosi casi di danni anche prossimi al collasso per strutture moderne in cemento armato.

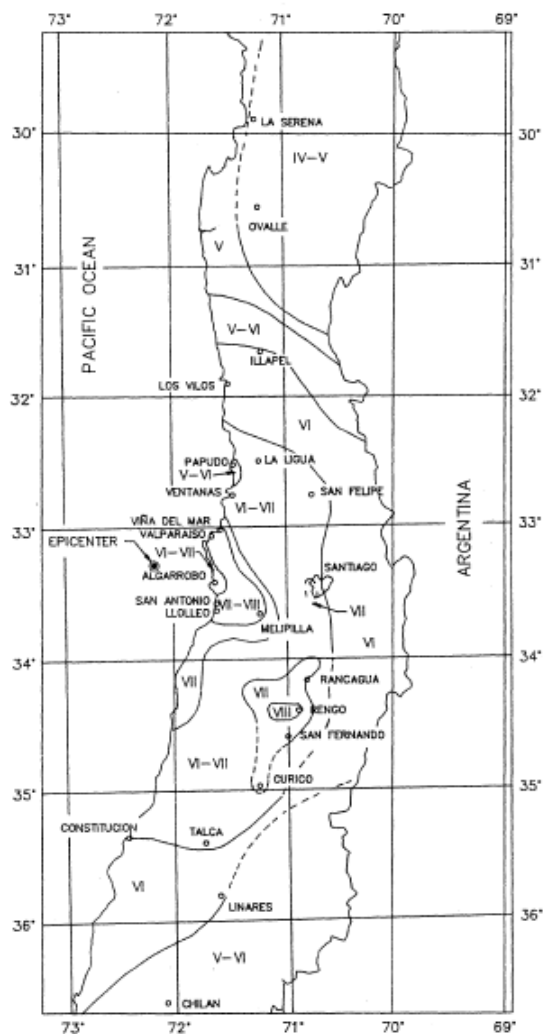


Figura 8.13. Mappa delle intensità del terremoto del 1985 in Cile (Wood et al., 1987). Coordinate epicentrali: -33 6' 0", -71 54' 0" (fonte: Departamento de Geofisica, Universidad de Chile)

Un confronto diretto tra il terremoto del 27 febbraio 2010 e quello del 3 marzo 1985 dimostra quanto detto in precedenza: in figura 8.14 è riportata la mappa che mostra le localizzazioni degli epicentri dei due terremoti e della stazione di registrazione di Melipilla, in figura 8.15 sono riportati gli accelerogrammi (direzione ns) dei due terremoti registrati nella stessa stazione di Melipilla; si osserva che:

- maggiore durata del movimento forte per il terremoto del 2010: 35 secondi per il terremoto più recente contro i 25 secondi del terremoto del 1985;
- bassa frequenza delle onde per il terremoto più recente: nell'intervallo temporale a cavallo del massimo valore di accelerazione si osserva un $v_0=13,7$ per il 1985 e $v_0=8,6$ per il 2010;
- accelerazioni massime comparabili: $PGA_{1985}=0,653g$, $PGA_{2010}=0,648g$.

Inoltre sembrerebbe che la registrazione del 2010 sia maggiormente influenzata dal passaggio dell'onda attraverso le asperità presenti sul piano di faglia (vi sono diversi picchi in istanti differenti, distanziati da secondi con un basso valore di accelerazione (vibrazione libera del suolo); ad esempio al secondo 18 ed al 25), diversamente dalla registrazione del 1985, probabilmente poiché Melipilla dista solo 95 km

dall'epicentro del terremoto del 3 marzo, e quindi le onde non sono passate da alcuna asperità prima di giungere al punto di registrazione, contrariamente a quanto avvenuto per il terremoto del 2010 per il quale l'epicentro dista 265 km.

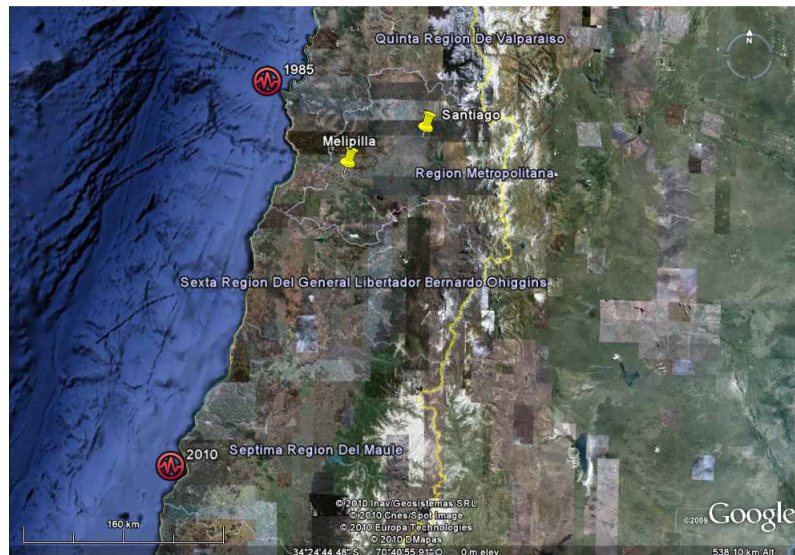


Figura 8.14. Localizzazione degli epicentri del terremoto del 27 febbraio 2010 e di quello del 3 marzo 1985, in giallo sono indicate la stazione di Melipilla e la città di Santiago come punto di riferimento. Distanza epicentro del 1985-stazione di Melipilla: 95 km, distanza epicentro del 2010-stazione di Melipilla: 265 km (fonte: sito COSMOS)

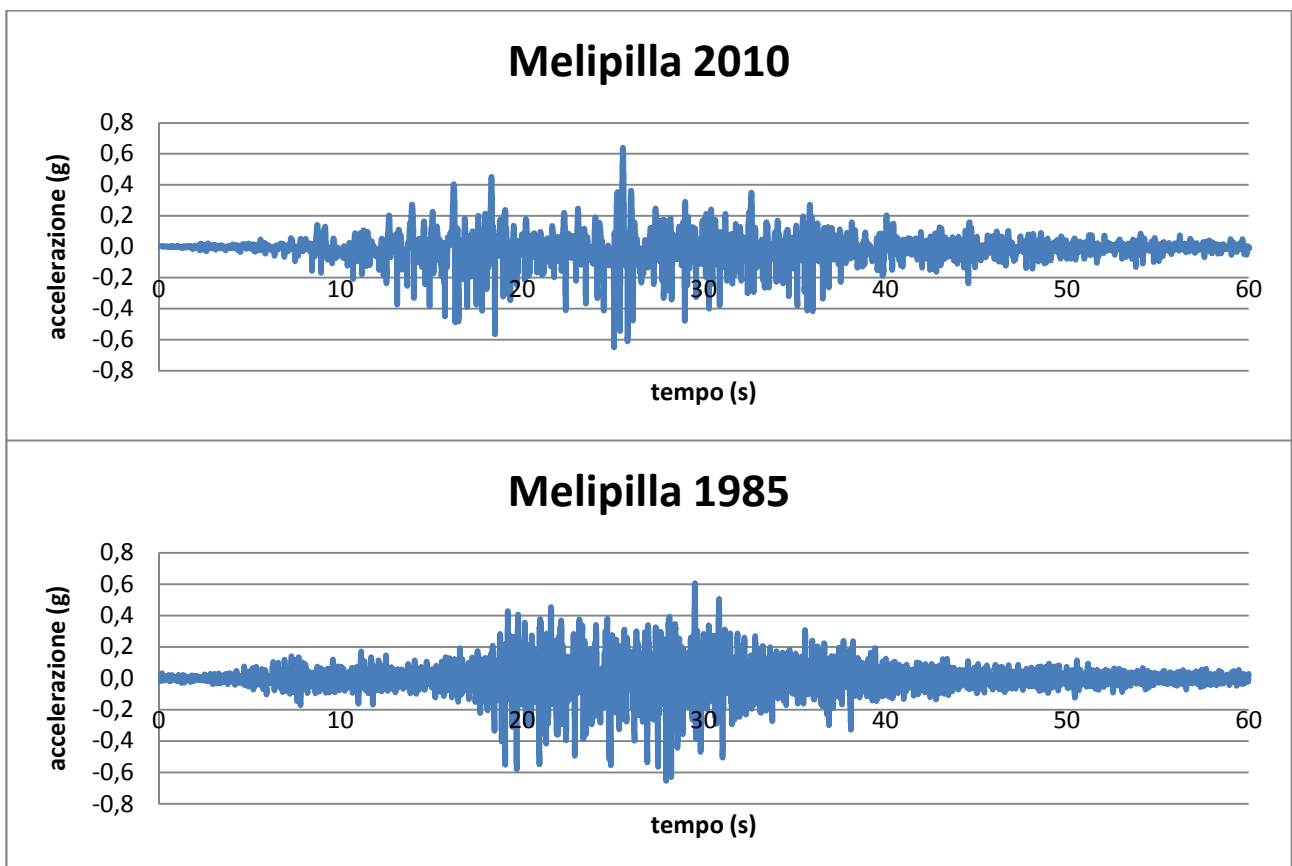


Figura 8.15. Accelerogrammi registrati nella stazione di Melipilla (dir. NS), terremoto del 27 febbraio 2010 (in alto) e del 3 marzo 1985 (in basso) (forniti personalmente dall'ing. S. Ruiz, Universidad de Chile)

Tabella 8.5. Caratteristiche principali delle sorgenti dei terremoti del 1985 e 2010 (fonte: COSMOS e USGS)

	1985	2010
magnitudo	Ms 7,8	Mw 8,8
profondità dell'epicentro	33 km	35 km
posizione epicentro	nel mare	nel mare
tipo di faglia	subduzione	subduzione

In figura 8.16 sono riportati gli spettri di risposta per le componenti ns della stazione di Melipilla per i due terremoti del 1985 e del 2010. In entrambi i casi si ha il picco dell'accelerazione spettrale in corrispondenza al periodo di 0,193s, ad una accelerazione di 1,74g (per il 1985) e 1,29g (per il 2010). In precedenza si è detto che il terremoto del 27 febbraio ha prodotto meno danni a costruzioni di 1 e 2 piani e più danni negli edifici alti rispetto ai terremoti precedenti; osservando lo spettro di risposta si nota che per un periodo proprio di edifici a due piani (T tra 0,10s e 0,20s) lo spettro del 2010 è inferiore rispetto a quello del 1985, viceversa per periodi propri di edifici alti (T di circa 2s).

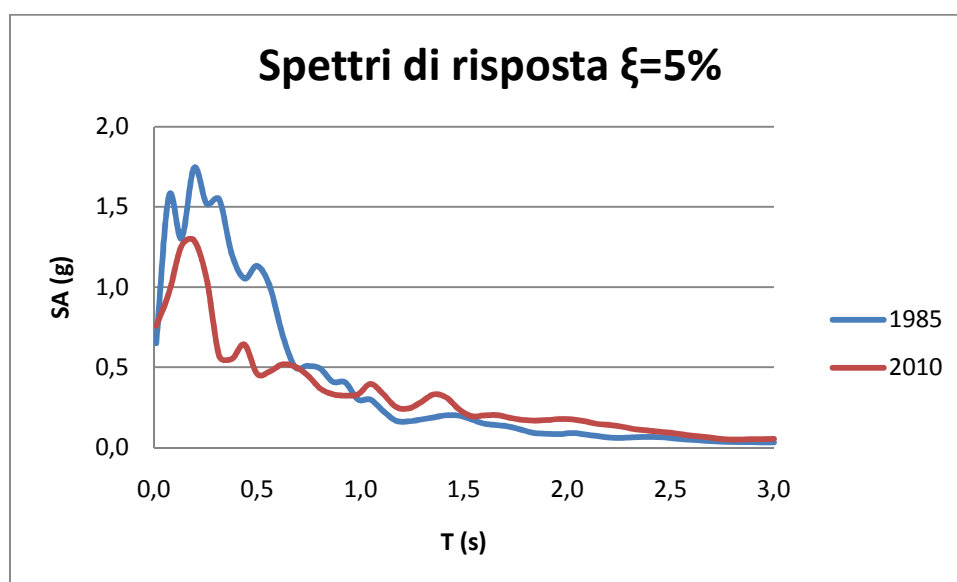


Figura 8.16. Spettri di risposta della stazione di Melipilla per il terremoto del 1985 e del 2010 in Cile (direzione ns)

8.5 Osservazione dei danni nella zona epicentrale a nord dell'epicentro e a Santiago

E' importante presentare alcune foto scattate nei giorni successivi alla scossa principale per comprendere il livello e le tipologie di danno che hanno subito le costruzioni a Santiago e nella zona epicentrale, in modo particolare a nord dell'epicentro.

I danni ricoprono un'area estesa per circa 600 km, le zone sono caratterizzate da una bassa entità del danno in confronto all'alto valore della magnitudo ed alla alta vulnerabilità del costruito; la città che presenta una intensità macrosismica maggiore, pari a 9, è Constitucion bassa.

I danni maggiori sono stati osservati nelle case in adobe (classe di vulnerabilità A) (figura 8.17) a causa della scarsa integrità globale, questi si manifestano come crepe verticali in corrispondenza dell'incontro dei muri e caduta parziale o totale dei muri, crepe sulle pareti divisorie in corrispondenza dell'incontro coi muri e caduta o danno locale del muro a causa della mancanza di un elemento d'appoggio della parete che impedisca che gli effetti di vibrazione delle pareti vengano trasmessi direttamente al muro. Un altro aspetto rilevante è la scarsa aderenza tra lo stucco ed il muro in adobe, ciò porta al distacco di grandi pezzi di stucco; ciò provoca insicurezza agli abitanti delle case anche se non compromette il sistema strutturale, quindi si dichiarano inabitabili e in molti casi vengono demolite.



Figura 8.17. Esempio di una casa in adobe con danno di grado 5. Foto scattata a Pichidegua circa 10 giorni dopo la scossa del 27 febbraio

L'altra tipologia abitazionale colpita, però in dimensioni molto più ridotte, è la muratura senza rinforzi: i danni sono causati principalmente dalla debolezza dell'unione tra i muri e la mancanza di un elemento che faccia da appoggio alle pareti e che impedisca che l'azione inerziale della parete si trasmetta direttamente al muro.

Tra le costruzioni più semplici, la muratura confinata è stata quella che ha retto maggiormente (figura 8.18): i pochi danni sono dovuti principalmente alla cattiva qualità della muratura e/o alla mancanza di un rinforzo attorno alle aperture (porte, finestre). Gli elementi di rinforzo sono molto importanti poiché

conferiscono integrità globale e locale alla struttura una volta che si creano delle crepe alle parti in muratura; ciò evita il formarsi di indebolimenti nelle parti portanti.



Figura 8.18. Esempio di una casa in muratura povera, essendo confinata ha retto ottimamente senza presentare alcun danno. Foto scattata a Santiago il giorno stesso della scossa principale

In figura 8.19 sono indicate le intensità macrosismiche stabilite in seguito alla visita, durata 10 giorni, nelle zone colpite. Si osserva che le località con intensità più alta si trovano nella VI e VII regione, zona in cui abita l'11,2% della popolazione cilena, e che 5 delle 7 località con una intensità di 8 gradi sono nella VII regione. La longitudine della zona in cui si è verificata una intensità di 8 gradi è dell'ordine di 240 km, e si trova tra le latitudini 34,5° sud e 36,5° sud. La zona danneggiata ($I_{MSK} \geq 6$) si trova tra il parallelo 33,5° e 38° latitudine sud, che corrisponde ad una zona con una longitudine dell'ordine di 500 km. Il danno si attenua rapidamente verso il sud dell'epicentro, ciò è la conseguenza del fatto che la rottura del contatto tra la placca di Nazca e la Sudamericana si è prodotto soprattutto verso il nord dell'epicentro.

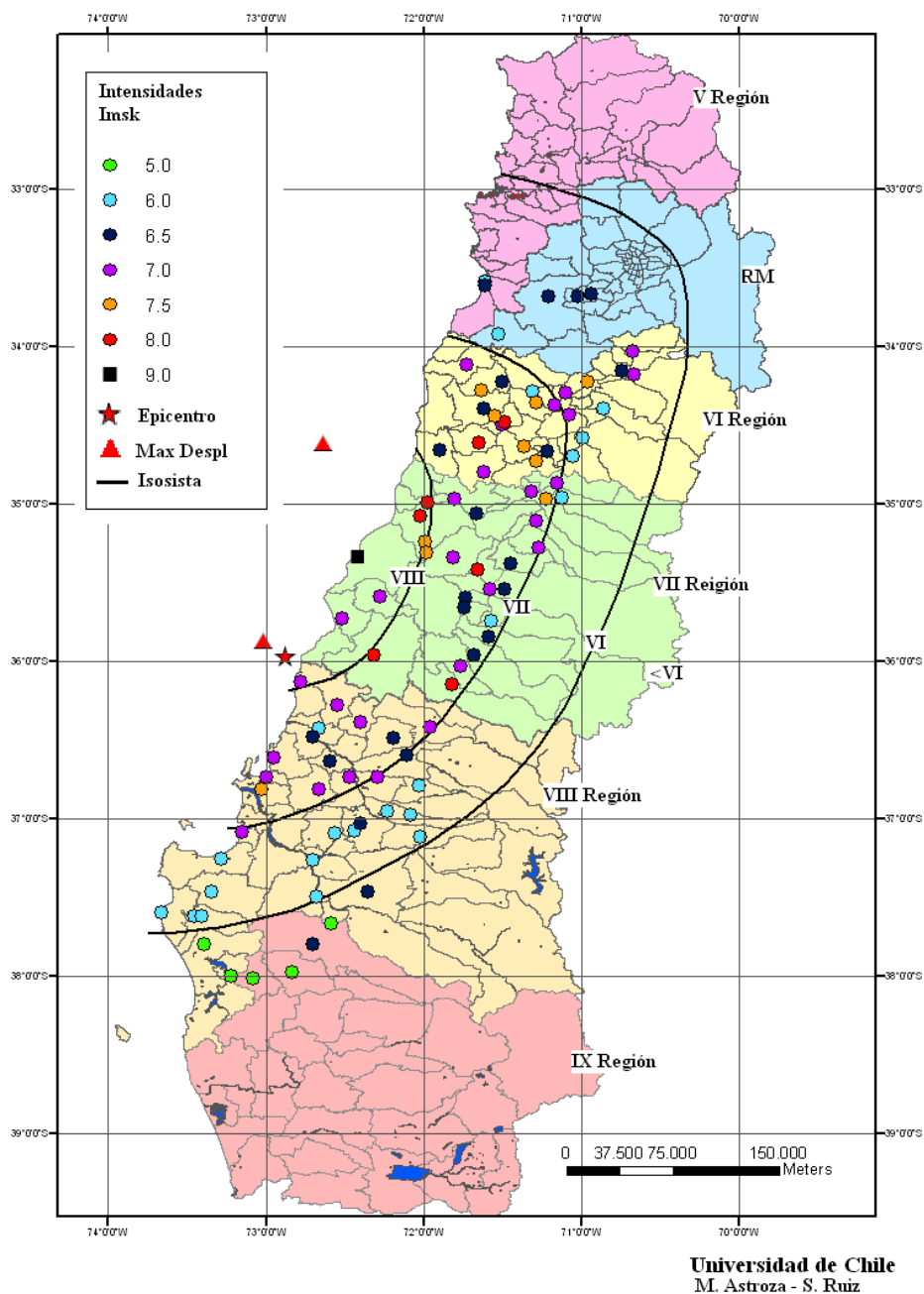


Figura 8.19. Intensità e isosisme della zona danneggiata in seguito al terremoto del 27 febbraio 2010; M. Astroza – S. Ruiz

Le intensità delle 98 località visitate sono state determinate in seguito ad una ispezione visiva dei danni di un campione di case di adobe e muratura confinata situate in un settore vicino alla plaza de armas (piazza principale di ogni paese) di ogni località, quindi il valore stimato è rappresentativo delle condizioni locali del settore visitato.

Per quanto detto si deve tenere in conto che il valore stimato dell'intensità sismica può subire variazioni al variare del settore a causa delle differenti condizioni locali. Inoltre è utile sottolineare che non sono stati considerati i danni nelle zone dove si è verificata liquefazione, assestamento e distacco parziale di colline o

rilievi. Queste situazioni si sono presentate nelle località di Retiro, Constitución, Yungay, Culinahue e Arauco.

Di seguito vengono presentati alcuni paesi e città visitate personalmente riportando le immagini più significative seguite da un commento. Viene indicata la distanza di ogni località dall'epicentro nonostante non sia una grandezza significativa poiché la rottura della faglia è lunga centinaia di chilometri, quindi l'entità del danno è maggiormente influenzata dalla vicinanza alle asperità. In tabella 8.6 sono riassunte le distanze epicentrali, l'intensità macrosismica attribuita e l'isosisma a cui appartiene ogni località.

Tabella 8.6. Nome, raggio epicentrale, intensità macrosismica e isosisma di appartenenza dei paesi presentati di seguito

Paese	Repi (km)	Imsk	Isosisma	Paese	Repi (km)	Imsk	Isosisma
Chimbarongo	199	6,0	VI	Pencahue	96	7,0	VII
Coltauco	228	7,5	VI	Peralillo	189	8,0	VII
Constitucion	63	9,0	VIII	Peumo	218	7,0	VI
Curepto	106	8,0	VIII	Pichicdegua	212	7,5	VI
Las Cabras	227	6,0	VI	Rancagua	261	6,5	VI
Licanten	114	8,0	VII	Romeral	176	6,0	VI
Machali	264	7,0	VI	San Fernando	211	6,5	VI
Marchihue	191	6,5	VI	Santa Cruz	170	7,5	VII
Nancagua	191	6,5	VII	Talca	108	8,0	VII
Paredones	152	6,5	VII				

Rancagua: situata a 261 km dall'epicentro della scossa principale del 27 febbraio 2010, non ha presentato gravi danni, date le caratteristiche del suolo questa città non ha mai subito danni esagerati in seguito ai terremoti.

Si propone un esempio di un edificio di 14 piani costruito negli anni '60 che ha presentato un danno di grado 1 che consiste nella caduta di intonaco (figura 8.20). Si noti che il primo piano dell'edificio è un piano terra debole, nonostante questa caratteristica non antisismica l'edificio si è comportato bene durante la scossa in quanto il piano terra è ben rinforzato e costituito da due muri spessi ai lati e due al centro (figura 8.21).



Figura 8.20 e 8.21. Rancagua. Edificio di 14 piani degli anni '60. Danno di grado 1 (a sinistra)
Particolare dell'edificio di 14 piani: il piano terra debole (a destra)

Machali: situato a 264 km dall'epicentro; ha presentato danni maggiori rispetto a Rancagua.

Comparando il danno tra le due case in adobe in figura 8.22 e 8.23, si nota che hanno un grado di danno rispettivamente 5 e 3; la maggior differenza strutturale è rappresentata dal rinforzo in legno e maglia di ferro della casa in figura 8.23. Si noti lo spessore del muro della casa in figura 8.22, spesso è possibile riconoscere le case in adobe proprio osservando le dimensioni delle pareti.



Figura 8.22 e 8.23. Machali. Casa in adobe. Danno di grado 5 (a sinistra)
Casa in adobe. Danno di grado 3 (a destra)

Coltauco: si trova a 228 km dall'epicentro.

La casa in figura 8.24 ha presentato un danno di grado 4: caduta di un muro. Spesso l'adobe ha presentato danni differenti a seconda del suo stato di mantenimento; in questo caso specifico il danno è molto elevato nonostante la casa fosse in ottime condizioni. Probabilmente il totale collasso di un capannone al lato della casa ha contribuito al danneggiamento.



Figura 8.24. Coltauco. Casa in adobe. Danno di grado 4

Las Cabras: situato a 227 km dall'epicentro, ha presentato un danno inferiore rispetto ai paesi vicini; la figura 8.25 è un esempio del basso livello di danno che ha colpito questo paese: la casa in adobe illustrata nella foto presenta un danno di grado 2 (crepe fini sui muri) nonostante si trovasse in uno stato di manutenzione pessimo.



Figura 8.25. Las Cabras. Casa in adobe. Danno di grado 2

Peumo: si trova a 218 km dall'epicentro.

La figura 8.26 mostra un esempio di adobe con mattoni, questo è un aggiustamento tipico successivo al terremoto del 1985, il problema è che la mescolanza tra differenti materiali provoca discontinuità nel muro tra la parte sotto la finestra ed il resto della parete; la presenza di questa particolare struttura spiega la ripetuta presenza di crepe sui muri posti sotto le finestre nelle case in adobe. La casa in figura 8.26 e 8.27 presenta un danno di grado 3.



Figura 8.26 e 8.27. Peumo. Particolare di una casa in adobe con danno di grado 3 (a sinistra)
Casa in adobe. Danno di grado 3 (a destra)

Pichidegua: situato a 212 km dall'epicentro, un esempio interessante è la scuola costruita in cemento armato che stava per essere ultimata a febbraio 2010 (figura 8.28); della scuola sono collassate alcune pareti interne di cemento costituito da vari pannelli applicati senza connessione al resto dell'edificio. Si nota che tutto il tetto (costituito da una struttura metallica) si è spostato di circa 50 cm e l'ingresso si è sganciato dal muro (figura 8.29).

Dalla figura 8.30 si osserva l'importanza delle travi di confinamento per i muri di mattoni; la parte della parete che non aveva la trave orizzontale di cemento è parzialmente crollata, mentre il resto del muro non ha presentato danni.



Figura 8.28, 8.29 e 8.30. Pichidegua. Scuola in cemento armato (in alto)
 Ingresso della scuola; si è sganciato dal muro e si è spostato di circa 50 cm (in basso a destra)
 Casa di mattoni (in basso a sinistra)



Marchihue: si trova a 191 km dall'epicentro.

La figura 8.31 mostra un tipo di struttura che in tutti i paesi visitati ha retto ottimamente in seguito alla scossa principale: la muratura confinata.



Figura 8.31. Marchihue. Casa in muratura confinata. Danno di grado 0

Peralillo: distante 189 km dall'epicentro, il comune è completamente collassato in seguito alla scossa del 27 febbraio 2010 (figura 8.32).

In figura 8.33 è evidente il differente comportamento di case con diverse strutture: al centro una casa in muratura e ai due lati due case in adobe; la casa in muratura ha presentato un danno di grado 2, le altre due costruzioni un danno di grado 5 (della casa a destra si è fotografato uno spazio piccolo in quanto consisteva unicamente in uno spiazzo vuoto dato che era già stata demolita, ciò significa che il danno poteva anche essere di grado 3 o 4, non necessariamente 5).



Figura 8.32 e 8.33. Comune di Peralillo, completamente collassato (a sinistra)
Da destra: Casa in adobe (danno di grado maggiore o uguale a 3), Casa in muratura (danno di grado 2),
Casa in adobe (danno di grado 5) (a destra)

Paredones: ha presentato un'intensità macrosismica 6,5, nonostante si trovi a solo 152 km dall'epicentro. Un esempio del basso livello di danni è riportato in figura 8.34 dove è presentata una casa in adobe a due piani; questo tipo di costruzione è molto rara in Cile e certamente non è adatta a resistere in seguito ai terremoti; nonostante ciò, trovandosi in questo paese, ha presentato un danno di grado 2.



Figura 8.34. Paredones. Casa in adobe di due piani. Danno di grado 2

Santa Cruz: si trova a 170 km dall'epicentro.

Un danno frequente è la caduta del solaio (danno di grado 3) (figura 8.35). In figura 8.36 è presentata una casa che aveva posto il tetto in metallo, eliminando il solaio, in seguito al terremoto del 1985 (informazione data dal proprietario della casa).



Figura 8.35 e 8.36. Santa Cruz. Casa in mattoni, caduta del solaio. Danno di grado 2
Casa in adobe, tetto rifatto in seguito al terremoto del 1985. Danno di grado 1

Nancagua: In figura 8.37 è illustrata la chiesa di Nancagua, un paese che si trova a 191 km dall'epicentro. Il campanile (figura 8.38) mostra il buon funzionamento delle murature in mattoni confinate; se non ci fosse stato il confinamento una struttura alta come il campanile sarebbe completamente crollata.



Figura 8.37 e 8.38. Nancagua. Chiesa in mattoni (a sinistra)
Campanile della chiesa in mattoni (a destra)

San Fernando: si trova a 211 km dall'epicentro.

A questa città è stato attribuito un livello di intensità macrosismica 6, durante la visita si è trovata solo una casa in adobe con un grado di danno 4 (figura 8.39); si noti l'integrità (danno grado 0) della struttura in muratura in mattoni confinata di figura 8.40.

L'edificio in figura 8.41 è stato costruito nel 1915, in seguito al terremoto del 27 febbraio 2010 ha presentato un danno di grado 2.



Figura 8.39 e 8.40. San Fernando. Casa in adobe. Danno di grado 4 (a sinistra)
Casa in muratura confinata. Danno di grado 1 (a destra)



Figura 8.41. Edificio del 1915. Danno di grado 2

Chimbarongo: distante 199 km dall'epicentro, ha presentato un livello di danno basso (intensità macrosismica 6), ciò è evidente osservando il comignolo di figura 8.42 che, nonostante sia molto alto e vecchio è rimasto integro.



Figura 8.42. Chimbarongo. Comignolo integro

Romeral: distante 176 km dall'epicentro, presenta una intensità macrosismica di grado 6; il lato positivo delle costruzioni è stata la leggerezza del materiale del tetto sostituito in seguito al terremoto del 1985; un tetto in metallo carica molto meno una struttura rispetto ad un tetto di tegole e fango (figura 8.43). Non sono stati trovati tetti con le tegole, ciò ha salvato il paese da un livello di danno superiore.



Figura 8.43. Romeral. Case in adobe con tetto in metallo. Danno di grado 2

Licantén: distante 114 km dall'epicentro, presentava un caso interessante riguardante delle case costruite su un terreno di riporto: tutte le case costruite dalla parte del campo su pilastri del tipo presentato nella figura 8.44 o sul terreno di riporto di terra hanno presentato danni di grado 4 o 5, le case presenti sull'altro lato della strada hanno subito danni nettamente minori. A tal proposito si mettano a confronto le due case di figura 8.44 e 8.45 poste una di fronte all'altra rispettivamente sul lato del terreno di riporto e sull'altro lato della strada; entrambe sono costruite in muratura ma hanno presentato un grado di danno completamente differente: una grado 5 e l'altra grado 1.



Figura 8.44 e 8.45. Licantén. Casa in muratura costruita su di un terreno di riporto. Danno di grado 5 (a sinistra)
Casa in muratura. Danno di grado 1 (a destra)

Curepto: situato a 106 km dall'epicentro, ha presentato un'intensità macrosismica 8.

Mettendo a confronto la figura 8.46 e 8.47 si nota il comportamento nettamente differente tra una costruzione in muratura confinata (danno grado 1) e abitazioni in adobe poste al lato del fiume (danno grado 5); certamente il terreno al lato di corsi d'acqua è molto meno stabile e quindi svantaggioso da un punto di vista sismico.



Figura 8.46 e 8.47. Curepto. Casa di muratura confinata. Danno di grado 1 (a sinistra)
Case in adobe costruite al lato del fiume. Danno di grado 5 (a destra)

Talca: in seguito al terremoto del 27 febbraio 2010 ha presentato un'intensità macrosismica di grado 8; la città dista dall'epicentro di 108 km.

Un esempio di danno a Talca frequentemente presentato è l'hotel Terranova (figura 8.48) in cui si nota una scarsa connessione della facciata al resto dell'edificio, infatti non si vedono dei ferri di connessione, inoltre la costruzione è fatta di differenti materiali (prevalentemente legno e cemento con ferri), ciò porta ad una scarsa unione tra i vari elementi.

In figura 8.49 è riportato un esempio lampante di una costruzione in muratura in cui non esiste alcuna connessione strutturale tra le varie pareti. L'edificio di 18 piani presentato in figura 8.50 ha presentato un danno di grado 1 in corrispondenza della giunta tra due parti della costruzione; questo tipo di danno si presenta frequentemente ma non impedisce la vivibilità agli abitanti.



Figura 8.48, 8.49 e 8.50. Talca. Hotel Terranova (in alto a sinistra)
 Casa in muratura. Danno di grado 4 (in basso)
 Edificio di 18 piani. Danno di grado 1 (in alto a destra)

Pencahue: si trova a 96 km dall'epicentro della scossa principale del 27 febbraio 2010.

Alla casa in adobe di figura 8.51 era stato applicato un supporto di cemento su entrambi i lati il mese anteriore all'evento, ciò ha permesso alla casa di presentare un danno basso (grado 2).



Figura 8.51. Pencahue. Casa in adobe con supporti laterali in cemento. Danno di grado 2

Constitución: dista dall'epicentro del terremoto del 27 febbraio 2010 di 63 km. Questa città ha presentato i maggiori danni a causa della scossa principale raggiungendo un grado di intensità macrosismica 9.

Di Constitución è stata percorsa solo la zona tra la parte colpita dal maremoto e quella precedente la collina più lontana dal mare. In figura 8.52 sono indicati i luoghi in cui sono state scattate le tre foto presentate.



Figura 8.52. Mappa del centro di Constitución. I numeri indicano i luoghi in cui sono state scattate le foto presentate (1 figura 8.53, 2 figura 8.54 e 3 figura 8.55)

In questa area si è notata una diversità tra differenti zone della parte bassa della città; nelle figure 8.53 e 8.54 è evidente il diverso livello di danno tra la zona più alta rispetto alla piazza principale (figura 8.53 scattata lungo via Montt verso est) e la zona più bassa (figura 8.54 scattata lungo via Montt verso ovest).

La casa rossa di figura 8.55 si trova nella zona bassa della città (via Balmaceda), l'acqua che ha distrutto parte della città a causa del maremoto è giunta fino alla via dove era ubicata questa casa; sul muro si può notare una linea che mostra fin dove è arrivata l'inondazione (altezza di circa 15 cm). Questa abitazione ha retto senza presentare danni anche perché è stata costruita ad un livello rialzato rispetto alla strada in quanto questa parte della città spesso viene colpita da alluvioni; inoltre la proprietaria ha spiegato che prima della costruzione il terreno è stato ben compattato per permettere il passaggio di camion al lato della casa senza provocare danni.



Figura 8.53, 8.54 e 8.55. Constitucion. Zona alta della città rispetto alla piazza (in alto a sinistra)
Zona bassa della città rispetto alla piazza (in alto a destra)
Casa in muratura della parte bassa della città. Danno di grado 1 (in basso)

A **Santiago** sono stati percorsi i quartieri Cerro Navia, Lo Prado, Universitario, Brasil, Yungay, Independencia e Maipù (figura 8.56). Di seguito vengono presentati alcuni danni significativi osservati.

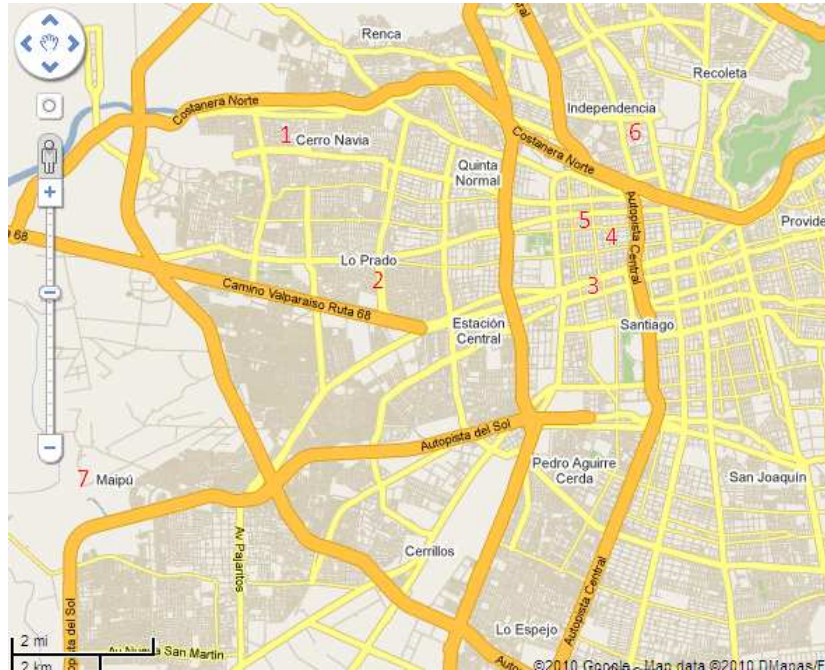


Figura 8.56. Santiago centro e dintorni. I numeri corrispondono alle zone visitate: 1 Cerro Navia, 2 Lo Prado, 3 Universitario, 4 Brasil, 5 Yungay, 6 Independencia, 7 Maipù

Santiago, quartiere Cerro Navia:

In figura 8.57 è riportata una costruzione tipica di questo quartiere popolare; si nota che la casa non è stata confinata correttamente, nonostante ciò non ha presentato danni in seguito al terremoto.



Figura 8.57. Tipica casa comunale in muratura confinata. Non presenta alcun danno

Santiago, quartiere universitario:

Una delle caratteristiche di questo quartiere è l'eterogeneità delle costruzioni: si trovano case in adobe di un piano (figura 8.58) affiancate ad edifici di 20 piani ed a costruzioni storiche principalmente trasformate

in università. La figura 8.58 mostra una tipica casa di quest'area in adobe; si noti che nonostante sia vecchia ed in cattivo stato, non è stata danneggiata in seguito alla scossa del 27 febbraio 2010.



Figura 8.58. Casa in adobe nel quartiere universitario di Santiago. Danno di grado 1

Santiago, quartiere Brasil:

Lo stile architettonico dell'area consiste in case antiche, molte in adobe, e alcuni edifici più moderni.

La figura 8.59 mostra un tipico esempio di caduta del solaio; questa foto è stata scattata il giorno stesso del terremoto, si noti la quantità di macerie cadute e non ancora rimosse. In molti casi il solaio era già crollato durante il terremoto del 1985 e sostituito con una lamina di metallo.



Figura 8.59. Danno ricorrente consistente nella caduta del parapetto. Foto scattata a Santiago il giorno stesso del terremoto

Santiago, quartiere Independencia:

L'edificio di 20 piani parzialmente fotografato in figura 8.60 e 8.61 presenta danni gravissimi al secondo piano (figura 8.60) e nel livello cantinato (figura 8.61). Probabilmente presenta un danno per rotazione, in corrispondenza dei piani bassi che sono i più deboli.



Figura 8.60 e 8.61. Particolari di un edificio di 20 piani con pareti di taglio
Livello scantinato dell'edificio

Santiago, quartiere Maipù:

Nel distretto di Maipù si sono trovati i due casi peggiori di danni in tutta la città di Santiago: l'edificio Don Luis (figura 8.63) e il Don Tristan (figura 8.64), costruiti dalla stessa impresa.

Questi due e l'O'Higgins di Concepcion sono gli unici tre casi di crolli di edifici in seguito alla scossa del 27 febbraio 2010.

Certamente nel caso di Maipù si può parlare di difetti nella progettazione e nel tipo di materiale utilizzato. Prova ne è che costruzioni molto simili, poste di fronte alle precedenti, hanno presentato danni lievi o assenti.

Uno dei difetti di progettazione dell'edificio Don Luis è l'orientazione dei pilastri del piano terra debole: la differenza di spessore nelle due direzioni porta all'indebolimento nella direzione segnata dalle frecce in figura 8.62. Si vedano i danni ai pilastri in figura 8.65 e 8.66.

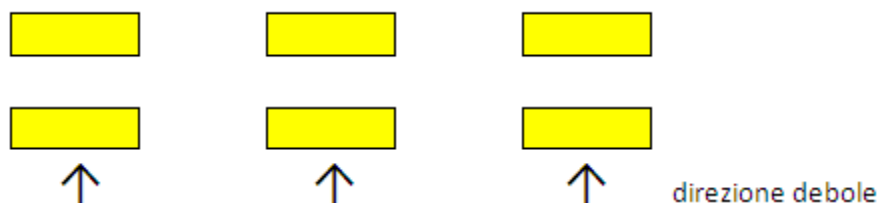


Figura 8.62. Visione in pianta dei pilastri che sorreggono l'edificio Don Luis di Maipù



Figura 8.63 e 8.64. Edificio Don Luis gravemente danneggiato. Danno grado 5 (a sinistra)
Edificio Don Tristan gravemente danneggiato. Danno grado 5 (a destra)



Figura 8.65 e 8.66. Danni ai pilastri dell'edificio Don Luis a Maipù

Dalla visita di cinque giorni in una parte della zona colpita dal terremoto del 27 febbraio 2010 si possono trarre numerose conclusioni:

- l'area danneggiata ha un'estensione di circa 600 km;
- l'intensità del danno varia enormemente senza tenere una forte dipendenza dalla distanza dall'epicentro;
- il grado di danno in generale non è elevato in confronto con la magnitudo del terremoto (M_w 8,8);
- il fattore suolo influenza enormemente sul grado di danno anche all'interno della stessa città;
- le strutture che generalmente subiscono un danno maggiore sono le chiese, le scuole e gli ospedali;
- le case in adobe sono le meno adatte per resistere ad una forte scossa sismica;
- il fattore peso, soprattutto per quanto riguarda il tetto, influenza enormemente la resistenza della costruzione;
- tra le abitazioni semplici certamente le case in muratura confinata sono le più efficienti dal punto di vista sismico;

- l'ingegneria civile cilena ha dimostrato di essere all'avanguardia nella costruzione di edifici antisismici infatti si è avuto il crollo di solo 3 edifici (2 a Santiago e 1 a Concepcion).

Per quanto riguarda la città di Santiago si è concluso che il grado 8 di intensità macrosismica, attribuito alla città il giorno stesso del terremoto, è scorretto; si è stimato un grado 6,5. Prova ne è che la maggior parte delle case in adobe non hanno subito danni superiori al grado 2 (si ricordi il caso del quartiere Brasil); in una città che presenta intensità macrosismica di grado 8 l'adobe sarebbe quasi completamente al suolo.

La tipologia strutturale che ha mostrato il comportamento migliore è la muratura confinata, costruzione economica, adatta per case di massimo 3 piani.

Le caratteristiche negative ricorrenti per gli edifici alti consistono in:

- piano terra debole: spesso rappresenta una soluzione semplice ed economica per stazionare le auto, però non si è dimostrata una scelta antisismica adatta;
- accostamento di parti dell'edificio di altezze differenti: ciò porta allo scontro tra i vari elementi provocando così un danneggiamento tra le parti in contatto;
- giunzione tra le parti dell'edificio: si sono presentati casi con giunti sismici inadeguati.

8.6 Confronto tra le caratteristiche del terremoto del Cile 2010 e de L'Aquila 2009

Il confronto tra la scossa del 6 aprile 2009 a L'Aquila e quella del 27 febbraio 2010 in Cile è molto interessante poiché si tratta di due terremoti con caratteristiche assai differenti.

Gli aspetti principali riguardano la magnitudo, la durata della scossa, le dimensioni della faglia e l'entità del danno sul territorio. Nella tabella 8.7 sono riassunte le maggiori differenze.

La magnitudo momento per il terremoto de L'Aquila è di 6,3, per il Cile è 8,8; tale differenza influenza la durata del moto sismico che risulta essere 12 s per il terremoto italiano contro i 140 s del terremoto cileno (figura 8.67), anche le dimensioni della faglia sorgente del terremoto crescono con la magnitudo: 26x11 km per L'Aquila e 450x150 km per il Cile (figura 8.68); nel primo caso si è trattato di una faglia normale, nel secondo di una faglia di subduzione. Entrambe le faglie sono caratterizzate da due asperità principali che hanno causato valori del numero delle intersezioni in un secondo dell'accelerogramma con l'asse dei tempi (v_0) elevati rispetto alla media mondiale.

Il terremoto del Cile ha certamente prodotto una intensità di danni minore: intensità del danno ≤ 8 ad eccezione di paesi che hanno presentato effetti di sito (S. Ruiz, Congresso Chileno de Sismologia e Ingegneria Antisismica 2010) (I_M massima 9 contro i 9,5 di Onna) poiché l'epicentro si trovava nel mare ed a una profondità quasi quattro volte maggiore (35 km contro 9,5 km); certamente la quantità di danni causati dalla scossa del 27 febbraio 2010 è superiore a quella dei danni del 6 aprile 2009 a causa dell'estensione della faglia: sul territorio italiano in un'area di 30 km si esauriva la zona colpita, nel caso del Cile i danni si

sono estesi lungo 600 km circa, però con una intensità inferiore. In entrambi i casi vi è stata una tipologia di costruzione che non ha retto nelle zone che hanno subito una scossa maggiore: in Cile le case in adobe hanno dimostrato di essere inadatte, mentre in centro Italia le abitazioni in pietra grezza. Un aspetto che può giustificare l'entità minore dei danni in Cile potrebbe anche riguardare una tipologia costruttiva più adatta a reggere le scosse sismiche. Comunque per dimostrare la grande capacità distruttiva del terremoto del Cile è sufficiente tenere presente che a Concepcion un edificio alto in cemento armato è collassato, una decina hanno rischiato il collasso e 30 sono rimasti inabitabili.

Tabella 8.7. Confronto tra le caratteristiche del terremoto del 6 aprile 2009 a L'Aquila e del 27 febbraio 2010 in Cile

	L'Aquila	Cile
magnitudo	6,3	8,8
durata della scossa	12 s	140 s
dimensioni della faglia	26x11 km	450x150 km
tipo faglia	normale	subduzione
profondità dell'epicentro	9,5 km	35 km
posizione dell'epicentro	sulla terra	nel mare
intensità macrosismica massima	9,5 (Onna)	9 (Constitucion Bajo)

figura 8.67

figura 8.68

Nella figura 8.67 è presentata la sovrapposizione degli accelerogrammi de L'Aquila (AQV) e di Concepcion (CCSP) in direzione ew (componente che ha registrato il valore di accelerazione più alto per entrambe le stazioni) con lo scopo di illustrare la differente durata delle scosse. Sono stati scelte a titolo d'esempio queste due registrazioni poiché entrambe si trovano in zona epicentrale; inoltre la AQV è la registrazione con l'accelerazione di picco maggiore (ad esclusione della AQM non affidabile).

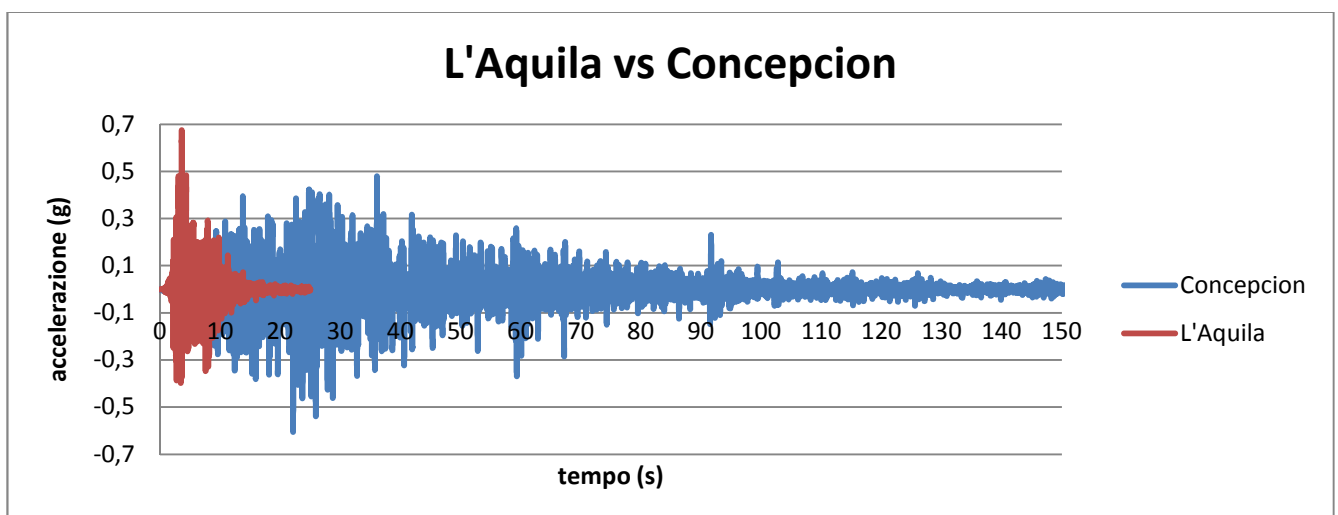


Figura 8.67. Sovrapposizione dell'accelerogramma registrato a Concepcion (stazione CCSP) e registrato a L'Aquila (stazione AQV) rispettivamente per il terremoto del Cile e dell'Italia. Lo scopo è quello di sottolineare la differenza della durata delle due scosse

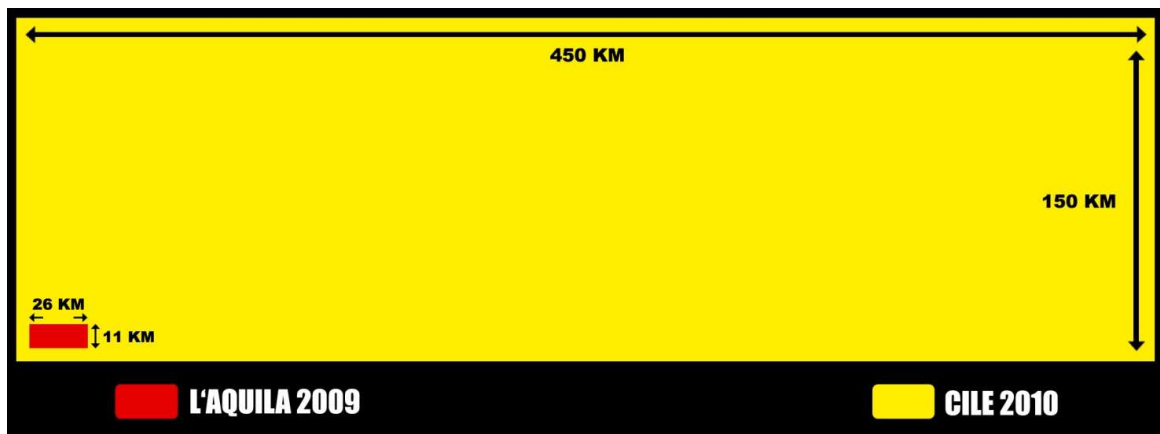


Figura 8.68. Confronto tra la dimensione della faglia de L'Aquila (26x11km) e quella del Cile (450x150km)

La "lesione principale" di entrambi i terremoti è che, indipendentemente della loro magnitudo, il danno è significativo principalmente nella zona delle asperità principali, con l'eccezione di alcuni casi di amplificazione dinamica del suolo o topografica.

Anche nel caso cileno ci sono due asperità dominanti, come detto in precedenza, una a Concepcion e l'altra a Pichilemu, inoltre esiste la possibilità di una terza della quale non sono state ancora identificate ne la posizione ne le sue proprietà.

In entrambi questi due terremoti le stazioni di registrazione si trovavano probabilmente vicino alle asperità, però non nel caso più vicino possibile, per questo è possibile che in futuro si possano ottenere valori di Pd più elevati per questi tipi di terremoti.

Nel caso del Cile le asperità dominanti hanno una larghezza di circa 20 km, nel caso de L'Aquila di 3-4 km; ciò porta ad una grande differenza. Inoltre la magnitudo associata ad ogni asperità nel caso del Cile è maggiore che nel caso de L'Aquila, considerando le differenze nelle magnitudo momento totali di ogni terremoto: 8,8 contro 6,3. In Cile parte dell'area delle asperità dominanti si trova sotto il livello del mare, diversamente dal caso italiano, ciò ha portato ad osservare una maggiore distruttività a L'Aquila.

Un altro aspetto importante riguarda la vulnerabilità delle strutture esistenti in entrambi i terremoti: l'adobe nel caso del Cile e muratura in pietra nel caso dell'Italia. Questa muratura è molto più vulnerabile, e di conseguenza fragile, dell'adobe cileno (informazione trasmessa oralmente da L. Decanini), quindi per uno stesso valore del Pd o del MCS ci si deve aspettare un maggior danno per la muratura che per l'adobe; ciò è stato pienamente confermato durante le visite a L'Aquila e a sud del Cile. Quindi la causa maggiore del livello del danno osservato in Italia è dovuto alla maggior vulnerabilità delle strutture esistenti.

Gli edifici in cemento armato che sono collassati a L'Aquila principalmente non seguivano le norme italiane ed erano mal costruiti, in Cile si presta molta più attenzione alla qualità del costruito per quanto riguarda le norme antisismiche. In Italia bisogna intervenire sull'alta vulnerabilità strutturale, poiché potrà succedere che terremoti con una bassa capacità distruttiva possano provocare molti danni. Il caso aquilano è un esempio evidente e mostra che un terremoto con Pd di $25 \text{ g} \cdot \text{s}^3 \cdot 10^{-4}$ ha prodotto un alto livello di danno, confrontato con il Pd di Concepcion di $300 \text{ g} \cdot \text{s}^3 \cdot 10^{-4}$.

8.7 Conclusioni

Le caratteristiche principali del forte terremoto del Cile del 27 febbraio 2010 riguardano la magnitudo (M_w 8,8), le dimensioni della faglia (450x150 km contro i 26x11 km de L'Aquila) e la durata (140 s contro i 12 s de L'Aquila), tutte grandezze correlate tra di loro.

Si è osservato che la tipologia costruttiva più vulnerabile nella zona italiana è risultata la muratura in pietra, mentre in Cile l'adobe.

Gli spettri di risposta hanno un andamento paragonabile a quelli ricavati dalle registrazioni del sisma de L'Aquila. Dallo studio dello spettro di risposta di Concepcion si osserva che questa città si trova in prossimità di una delle due asperità principali.

Il potenziale distruttivo di Concepcion è ben dieci volte superiore a quello delle registrazioni dell'aquilano, nonostante ciò in Italia si sono avuti più danni anche a causa dell'alta vulnerabilità delle costruzioni; in Italia si deve intervenire sull'alta vulnerabilità strutturale. Inoltre l'alto valore del P_d in Cile è dovuto principalmente alla durata del movimento forte ed alla bassa frequenza delle onde registrate (v_0 minore e quindi P_d maggiore; si ricordi che $P_d = \frac{I_A}{v_0^2}$).

Il sisma del 27 febbraio 2010 in Cile ha causato meno danni alle costruzioni di 1 e 2 piani rispetto ai terremoti passati, più danni agli edifici alti, il movimento forte ha avuto una maggiore durata e le onde registrate hanno presentato una bassa frequenza; tutte queste caratteristiche sono state confermate in seguito ad un confronto col terremoto del 3 marzo 1985.

Si è osservato che, tra le costruzioni semplici, economiche e di massimo 3 piani, le case in muratura confinata sono le più efficienti dal punto di vista sismico. L'ingegneria civile cilena ha dimostrato di essere all'avanguardia nella costruzione di edifici antisismici infatti si è avuto il crollo di solo 3 edifici (2 a Santiago e 1 a Concepcion).

9 Commenti e conclusioni

Il **terremoto del 6 aprile 2009** è stato l'**evento meglio registrato** nella storia sismica italiana, esso ha un'importanza rilevante non solo a livello nazionale ma anche mondiale, essendo state ottenute ben 56 registrazioni accelerometriche entro 280 km dall'epicentro.

A livello storico i terremoti più significativi dell'area colpita sono degli anni 1315 ($M_w \geq 6,7$), 1349 ($M_w \geq 6,5$), 1461 ($M_w \geq 6,5$), 1703 ($M_w \geq 6,7$) e 1915 ($M_w \geq 7,0$).

Attualmente la comunità scientifica tende a considerare i terremoti del 1461 e del 2009 come il risultato dell'attivazione di una sorgente la cui espressione in superficie è rappresentata dalla faglia ridefinita Collebrincioni-San Demetrio (PFS, Paganica Fault System) (figura 2.5). Il tasso di scorrimento di questa faglia è stato valutato in modo preliminare tra 0,3 e 0,7 mm/anno, tipico per le faglie appenniniche.

Il contesto sismotettonico dell'area interessata dal terremoto aquilano del 6 aprile 2009 si può inquadrare nei processi estensionali che caratterizzano la deformazione della crosta appenninica ed in particolare in quelli relativi alla distensione NE-SW di questo settore di catena. Tale estensione (valutata nell'ordine dei 3 mm/anno tramite misurazioni GPS; Mantenuto et al., 2007) è accomodata da faglie normali ad andamento NW-SE ed immersione tirrenica, alle quali va attribuita tutta la maggiore sismicità dell'Appennino centrale (Galadini e Galli, 2000).

Sono state colpite dal terremoto un totale di 81 località, 49 delle quali hanno presentato un'**intensità macrosismica MCS** (Mercalli-Cancani-Sieberg) tra grado VI e X. Molti dei beni culturali e artistici della regione sono stati seriamente danneggiati o distrutti, incluse alcune chiese romaniche, dei palazzi e altri monumenti medioevali e rinascimentali. I centri storici dei paesi della valle del fiume Aterno a sud de L'Aquila (Onna, Paganica e Castelnuovo) sono stati praticamente distrutti, con un'intensità MCS fino al grado X. Diversamente, i danni non hanno superato un grado di intensità MCS superiore al VI a nord-ovest de L'Aquila. La concentrazione dei danni a sud-est probabilmente riflette la combinazione della direzionalità della rottura con gli effetti di amplificazione sismica causata dalla litostratigrafia. Le località più danneggiate si trovano sulla proiezione della faglia in superficie, ad esclusione di Castelnuovo che ha presentato intensità macrosismica 9 soprattutto a causa della sua particolare topografia; in area mesosismica l'intensità massima è stata assegnata a Castelnuovo e ad Onna ($I_s = 9-10$ MCS), dove circa la metà degli edifici sono crollati.

Per il gruppo QUEST dell'INGV non è sempre stato semplice attribuire il grado di intensità macrosismica alle diverse località, in quanto in molti casi vi è una marcata differenza nelle tipologie del costruito tra il centro storico e la parte più esterna; per esempio a L'Aquila è stata attribuita intensità tra 8 e 9 valutando il solo centro, tale valore non è direttamente attribuibile all'intera città.

Le abitazioni in muratura sono una tipologia di costruito tipica della zona dell'aquilano, la scarsa qualità di queste costruzioni gli attribuisce un'**alta vulnerabilità**, superiore a quella delle costruzioni in adobe. Si

ritiene che la breve durata della scossa principale del 6 aprile abbia contribuito a salvare molte costruzioni dal collasso.

Nelle zone maggiormente danneggiate non vi erano strumenti di registrazione, ad esclusione della stazione AQK posta a L'Aquila, però non ubicata nel centro storico. Le altre quattro stazioni appartenenti alla microrete dell'Aterno sono localizzate a Coppito (Imcs=6,5, stazioni AQA e AQG) e a Cansatessa (Imcs 6,5, stazioni AQM e AQV).

Non è possibile tracciare le isosisme in quanto vi sono diverse anomalie nei gradi di intensità attribuiti, poiché hanno influenzato molto la topografia, le condizioni geologiche e la presenza delle asperità sul piano di faglia; in linea di massima si può identificare l'area che ha presentato un grado di danno maggiore di 6.

In seguito alla visita diretta in sito, si è osservato che diversi centri colpiti dal sisma hanno subito livelli di danno molto differenziati, ciò dipende sostanzialmente dalle caratteristiche topografiche (principale causa della distruzione di Castelnuovo), dalla geologia locale e parzialmente dalla direttività correlata alla faglia responsabile del terremoto del 6 aprile. Inoltre i danni osservati variano sostanzialmente in base alla localizzazione, alla tipologia di costruzione, all'età e alle condizioni dell'edificio.

L'attribuzione del grado di intensità macrosismica è importante in quanto rappresentativo del livello di danno; la differenza di anche solo un grado descrive scenari di distruttività nettamente differenti: ad esempio tra Paganica (intensità 8) e San Gregorio (intensità 9) si passa da una località fortemente danneggiata ad una rasa al suolo.

A L'Aquila gli edifici di cemento armato hanno generalmente retto bene senza presentare danni strutturali, inoltre le costruzioni precedentemente rinforzate si sono comportate meglio rispetto alle altre; nel capoluogo i danni sono stati minori rispetto ad alcuni paesi circostanti, grazie all'uso di materiali migliori durante la costruzione.

Dallo studio degli **accelerogrammi** si osserva una durata del movimento sismico principale di 12 secondi.

Il valore massimo di PGA (PGV) è $11,47 \text{ m/s}^2$ ($0,46 \text{ m/s}$) registrato nella stazione AQM (AQV), in generale tutti i PGA delle stazioni ubicate sulla proiezione della faglia in superficie (AQA, AQG, AQK, AQM e AQV) sono maggiori di $3,5 \text{ m/s}^2$ e i PGV sono maggiori di $0,3 \text{ m/s}$.

Sia per le accelerazioni che per le velocità e gli spostamenti si nota un impulso di lunga durata all'inizio del moto; tali impulsi, che si presentano spesso in condizioni di near-field e non avvengono talvolta in concomitanza del picco in accelerazione, hanno un forte contenuto energetico e potrebbero essere rappresentativi di una asperità probabilmente situata in corrispondenza della zona delle stazioni AQA, AQG, AQM e AQV. L'impulso ha un periodo di 1 secondo, ciò significa che l'asperità potrebbe avere un diametro approssimativamente di 3 km. Sono state individuate **due possibili asperità** sul piano della faglia che ha causato il terremoto. La presenza delle due asperità potrebbe aver influenzato il livello di danno di diversi centri abitati portando ad un valore del potenziale distruttivo più elevato rispetto ad un ipotetico caso di faglia senza rugosità.

In seguito al confronto tra i dati registrati durante la scossa principale del 6 aprile 2009 e l'andamento della relazione di attenuazione formulata da Akkar-Bommer si osserva che i dati seguono più coerentemente la relazione generale per una distanza compresa tra i 5 e i 100 km di distanza, in generale i dati near-source sono sottostimati e le registrazioni ottenute ad una distanza maggiore di 100 km sono sovrastimate. Le asperità non vengono prese in considerazione nelle relazioni di attenuazione e conseguentemente si possono osservare dei valori di accelerazione più alti di quelli previsti e quindi anche un livello di danno maggiore.

Dall'analisi delle registrazioni ottenute in AQM si notano alcune caratteristiche comuni a quelle delle altre stazioni, ciò potrebbe significare che le registrazioni della stazione AQM abbiano diversi aspetti validi.

Ponendo in correlazione i valori del parametro P_{DH} (**Potenziale Distruttivo di Araya e Saragoni**) calcolati ed i valori dell'intensità macrosismica MCS si osserva che, ad esclusione del dato riguardante la stazione AQK, l'andamento è ben raffigurato dalla curva di Araya e Saragoni (1984) (figura 7.2). È stata discussa l'ubicazione della stazione AQK rispetto al centro storico, al quale si fa riferimento per stabilire il valore dell'intensità macrosismica, e il valore di intensità macrosismica attribuito alla città de L'Aquila; concludendo che probabilmente risulta più coerente con le osservazioni fatte nel paragrafo 5.2.3 e 7.2.2 attribuire un'intensità 7 se ci si riferisce all'intera città de L'Aquila.

I valori del Potenziale Distruttivo del terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009 sono stati confrontati con quelli dei maggiori terremoti italiani e si è notato che le registrazioni dell'aquilano si trovano ai primi posti per tutti e tre i tipi di suolo (tabella 7.2).

In seguito ad un confronto tra l'andamento di differenti parametri rappresentativi del danno ed il valore dell'intensità macrosismica si osserva che la grandezza che sembra descrivere meglio i danni è il P_{DH} di Araya e Saragoni poiché tiene in considerazione l'ampiezza, la durata e il contenuto in frequenza degli accelerogrammi dei terremoti (figura 7.8).

In tutte le località in cui sono ubicate le stazioni non si sono mostrati dei livelli di danni elevati (intensità macrosismica massima 6,5 ad esclusione della AQK che ha una intensità macrosismica 9, valore ampiamente discusso) infatti il potenziale distruttivo non ha dei valori esageratamente elevati nonostante le accelerazioni di picco siano tra 0,3 g e 1,17 g (PGA della stazione AQM eliminato dalla Protezione Civile) per le stazioni ubicate sulla proiezione di faglia in superficie, ciò è stato verificato probabilmente a causa della presenza delle asperità che portano ad un aumento del valore d'accelerazione e contemporaneamente ad un aumento di v_0 (**frequenza caratteristica**).

Per una buona stima del P_D è importante che la rete accelerometrica sia densa, in generale il valore del potenziale distruttivo è tanto maggiore quanto si è prossimi alla faglia; non è da escludere che in futuro si otterranno registrazioni con valori di P_D elevati, grazie alla nuova rete strumentale italiana molto densa che aumenterà la probabilità di registrare una scossa molto vicino alla faglia e specialmente alle sue asperità.

Con la conoscenza della potenzialità distruttiva di terremoti già avvenuti in determinati territori, si avrà la possibilità di costruire in modo più idoneo basandosi sul comportamento delle scosse analizzate.

Le caratteristiche principali del forte **terremoto del Cile del 27 febbraio 2010** riguardano la magnitudo (M_w 8,8), le dimensioni della faglia (450x150 km contro i 26x11 km de L'Aquila) e la durata (140 s contro i 12 s de L'Aquila), tutte grandezze correlate tra di loro.

Si è osservato che la tipologia costruttiva più vulnerabile nella zona italiana è risultata la muratura in pietra, mentre in Cile l'**adobe**.

Gli spettri di risposta hanno un andamento paragonabile a quelli ricavati dalle registrazioni del sisma de L'Aquila. Dallo studio dello spettro di risposta di Concepcion si osserva che questa città si trova in prossimità di una delle due asperità principali.

Il potenziale distruttivo di Concepcion è ben dieci volte superiore a quello delle registrazioni dell'aquilano, nonostante ciò in Italia si sono avuti più danni anche a causa dell'alta vulnerabilità delle costruzioni; in Italia si deve intervenire sull'alta vulnerabilità strutturale. Inoltre l'alto valore del P_D in Cile è dovuto principalmente alla durata del movimento forte ed alla bassa frequenza delle onde registrate (v_0 minore e quindi P_D maggiore; si ricordi che $P_D = \frac{I_A}{v_0^2}$).

Il sisma del 27 febbraio 2010 in Cile ha causato meno danni alle costruzioni di 1 e 2 piani rispetto ai terremoti passati, più danni agli edifici alti, il movimento forte ha avuto una maggiore durata e le onde registrate hanno presentato una bassa frequenza; tutte queste caratteristiche sono state confermate in seguito ad un confronto col terremoto del 3 marzo 1985 di Valparaiso, Cile.

Si è osservato che, tra le costruzioni semplici, economiche e di massimo 3 piani, le **case in muratura confinata** sono le più efficienti dal punto di vista sismico. L'ingegneria civile cilena ha dimostrato di essere all'avanguardia nella costruzione di edifici antisismici infatti si è avuto il crollo di solo 3 edifici (2 a Santiago e 1 a Concepcion).

Appendice A

Scala MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg) di intensità del terremoto

(versione del 1930, dal Bollettino Macrosismico dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia)

I grado

Impercettibile: rilevato soltanto da sismografi.

II grado

Molto leggero: sentito soltanto da persone estremamente sensibili o nervose, in perfetta quiete e quasi sempre nei piani superiori dei caseggiati.

III grado

Leggero: anche in zone densamente abitate viene percepito come terremoto, soltanto da una piccola parte degli abitanti nell'interno delle case, come nel caso del passaggio di un pesante mezzo. Da alcuni viene riconosciuto come terremoto soltanto dopo averne parlato con altri.

IV grado

Moderato: all'aperto il terremoto è percepito da pochi. Nelle case è notato da numerose persone ma non da tutti, a seguito del tremolio o di oscillazioni leggere di mobili. Cristalleria e vasellame, posti a breve distanza, urtano come al passaggio di un pesante autocarro su strada dissestata. Finestre tintinnano; porte, travi e assi in legno scricchiolano; cricchiano i soffitti. In recipienti aperti, i liquidi vengono leggermente mossi. Si ha la sensazione che in casa si sia rovesciato un oggetto pesante; si oscilla con tutta la sedia o il letto come su una barca. In generale questi movimenti non provocano paura a meno che le persone non si siano innervosite o spaventate a causa di terremoti precedenti. In rari casi i dormienti si svegliano.

V grado

Abbastanza forte: nel pieno delle attività giornaliere, il sisma viene percepito da numerose persone nelle strade e se sensibili anche in campo aperto. In casa si avverte in seguito allo scuotere dell'intero edificio. Piante e piccoli rami di cespugli ed alberi si muovono con evidenza, come se ci fosse un vento moderato. Oggetti pendenti come lampade, tendaggi, lampadari non troppo pesanti entrano in oscillazione, campanelle suonano. Gli orologi a pendolo si fermano od oscillano con maggior periodo, a seconda della direzione della scossa se perpendicolare o normale al moto di oscillazione. A volte orologi a pendolo fermi riprendono il movimento. La luce elettrica guizza o viene a mancare in seguito a movimenti della linea. I quadri urtano, battono contro le pareti oppure si spostano; da recipienti colmi e aperti vengono versate piccole quantità di liquido; ninnoli ed oggetti del genere possono cadere come pure gli oggetti addossati alle pareti; arredi leggeri possono essere spostati di poco; mobili rintonano; porte ed imposte sbattono; vetri delle finestre si infrangono. Quasi tutti i dormienti si svegliano. Sporadici gruppi di persone fuggono all'aperto.

VI grado

Forte: il terremoto viene notato da tutti con paura, molti fuggono all'aperto, alcuni hanno la sensazione d'instabilità. Liquidi si muovono fortemente; quadri, libri e cose simili cadono dalle pareti e dagli scaffali; porcellane si frantumano; suppellettili assai stabili, e perfino pezzi d'arredo vengono spostati se non rovesciati; piccole campane in cappelle e chiese, e orologi di campanili battono. Case isolate, solidamente costruite subiscono danni leggeri; spaccature all'intonaco, caduta del rinzaffo di soffitti e di pareti. Danni più forti, ma non ancora pericolosi, si hanno sugli edifici mal costruiti. Qualche tegola e pietra di camino cade.

VII grado

Molto forte: notevoli danni vengono provocati ad oggetti di arredamento anche di grande peso. Grandi campane rintoccano. Corsi d'acqua, stagni e laghi si agitano e s'intorbidiscono a causa della melma mosca. Qua e là, parte delle sponde di sabbia e ghiaia scivolano via. Varia la portata delle sorgenti. Danni moderati a numerosi edifici costruiti solidamente: piccole spaccature nei muri; caduta di toppe piuttosto grandi dell'incalcinatura e dello stucco, a volte anche di mattoni. Caduta generale di tegole. Molti fumaioli vengono lesi da incrinature. Camini già danneggiati si rovesciano sopra il tetto danneggiandolo. Da torri e costruzioni alte cadono decorazioni mal fissate. Quando la casa è a pareti intelaiate, i danni all'incalcinatura e all'intelaiatura sono più gravi. In casi isolati distruzione di case mal costruite oppure riattate.

VIII grado

Rovinoso: interi rami d'albero pendono rotti e perfino si staccano. Anche i mobili più pesanti vengono spostati lontano e a volte rovesciati. Statue, monumenti in chiese, in cimiteri e parchi pubblici, ruotano sul proprio piedistallo oppure si rovesciano. Solidi muri di cinta in pietra si rompono e crollano. Circa un quarto delle case è gravemente leso, alcune crollano, molte diventano inabitabili; gran parte di queste cadono. Negli edifici intelaiati cade gran parte della tamponatura. Case in legno vengono schiacciate o rovesciate. Spesso campanili di chiese e di fabbriche con la loro caduta causano danni agli edifici vicini più di quanto non avrebbe fatto da solo il terremoto. In pendii e terreni acquitrinosi si formano crepe. In terreni bagnati si ha l'espulsione di sabbia e di melma.

IX grado

Distruttivo: circa la metà di case in pietra sono distrutte; molte crollano; la maggior parte diviene inabitabile. Case ad intelaiature sono divelte dalle proprie fondamenta e crollano; travi strappate a seconda delle circostanze contribuiscono alla rovina.

X grado

Completamente distruttivo: gravissima distruzione di circa 3/4 degli edifici, la maggior parte crolla. Perfino costruzioni solide di legno e ponti subiscono gravi lesioni, alcuni vengono distrutti. Argini e dighe ecc., chi più, chi meno, sono danneggiati notevolmente, binari leggermente piegati e tubature (gas, acqua e scarichi) vengono troncate, rotte e schiacciate. Nelle strade lastricate e asfaltate si formano crepe e per pressione

sporgono larghe pieghe ondose. In terreni meno densi e più umidi si creano spaccature fino alla larghezza di più decimetri; si notano parallelamente ai corsi d'acqua spaccature che raggiungono larghezze fino a un metro. Non solo pezzi di terreno scivolano dai pendii, ma interi macigni rotolano a valle. Grossi massi si staccano dagli argini dei fiumi e da coste scoscese; riviere basse subiscono spostamenti di masse sabbiose e fangose, per cui il livello del terreno viene notevolmente variato. Le sorgenti subiscono frequenti cambiamenti di livello dell'acqua. Da fiumi, canali e laghi ecc. le acque vengono gettate contro le sponde.

XI grado

Catastrofico: crollo di tutti gli edifici in muratura, resistono soltanto le capanne di legno e le costruzioni ad incastro di grande elasticità. Anche i ponti più sicuri crollano a causa della caduta di pilastri in pietra o del cedimento di quelli in ferro. Binari si piegano fortemente e si spezzano. Tubature interrato vengono spaccate e rese irreparabili. Nel terreno si manifestano vari mutamenti di notevole estensione, a seconda della natura del suolo, si aprono grandi crepe e spaccature; soprattutto in terreni morbidi e acquitrinosi il dissesto è considerevole sia orizzontalmente che verticalmente. Ne segue il trabocco di sabbia e melma con diverse manifestazioni. Sono frequenti lo sfaldamento di terreni e la caduta di massi.

XII grado

Grandemente catastrofico: non regge alcuna opera dell'uomo. Lo sconvolgimento del paesaggio assume aspetti grandiosi. Corsi d'acqua sia superficiali che sotterranei subiscono mutamenti vari, si formano cascate, scompaiono laghi, fiumi deviano.

Appendice B

Classificazione del danno alle costruzioni in muratura e in CA

Gradi di danno per le costruzioni in MURATURA



Grado 1: Danno da trascurabile a leggero

Nessun danno strutturale, danni non strutturali leggeri

- fessure millimetriche in alcune pareti
- distacco di piccole parti di intonaco
- rari casi di caduta di pietre non legate dalle parti superiori della struttura



Grado 2: Danno moderato

Danni strutturali leggeri, danni non strutturali moderati

- crepe in molte pareti
- distacco di porzioni piuttosto grandi di intonaco
- crollo parziale dei camini



Grado 3: Danno da sostanziale a grave

Danni strutturali moderati, danni non strutturali gravi

- larghe e estese crepe nella maggior parte delle pareti
- distacco delle tegole del tetto, i camini si spezzano alla linea del tetto
- collasso di diversi elementi non strutturali



Grado 4: Danno molto grave

Danni strutturali pesanti, danni non strutturali molto pesanti

- collasso effettivo delle pareti
- parziale collasso strutturale di tetti e solai



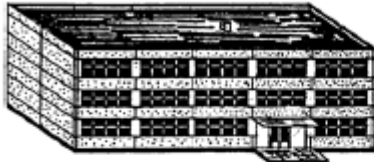
Grado 5: Distruzione

Danni strutturali gravissimi

- collasso totale o quasi totale

Figura B.1. Classificazione del danno alle strutture in muratura nella scala EMS98. Da Grunthal (1998)

Gradi di danno per le costruzioni in CA



Grado 1: Danno da trascurabile a leggero

Nessun danno strutturale, leggeri danni non strutturali

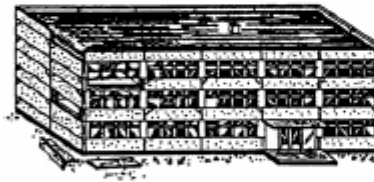
- fessure capillari nell'intonaco
- fessure capillari in pareti divisorie o tamponature



Grado 2: Danno moderato

Danni strutturali leggeri, moderati danni non strutturali

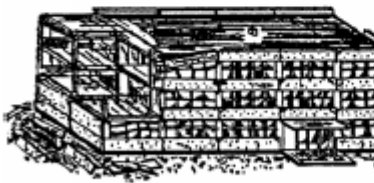
- fessure nei pilastri e nelle travi dei telai, nelle pareti strutturali
- fessure nelle pareti e nelle tamponature
- caduta di controsoffitti fragili e intonaco
- caduta di malta dai giunti dei pannelli murari



Grado 3: Danno da sostanziale a grave

Danni strutturali moderati, danni non strutturali gravi

- crepe nei pilastri, nei giunti trave pilastro, nei giunti delle pareti accoppiate
- espulsione del copriferro, inarcamento delle barre di armatura
- grandi crepe in pareti e tamponature
- collasso di singole tamponature



Grado 4: Danno molto grave

Danni strutturali gravi, danni non strutturali molto gravi

- grandi crepe nei membri strutturali
- rottura a compressione del calcestruzzo, frattura delle barre di armatura
- perdita di aderenza delle barre di armatura delle travi
- rotazione dei pilastri, crollo di alcun pilastri o di singoli piani superiori





Grado 5: Distruzione

Danni strutturali gravissimi

- crollo del pianterreno o di parti degli edifici

Figura B.2. Classificazione del danno alle strutture in CA nella scala EMS98. Da Grunthal (1998)

Appendice C: Scheda di valutazione e censimento dei danni della Chiesa di Santa Maria del Suffragio a L'Aquila

 <p>Ministero per i Beni e le Attività Culturali</p>  <p>Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici per l'Abruzzo - L'Aquila</p>	 <p>PROTEZIONE CIVILE NAZIONALE</p> <p>EVENTI SISMICI D'ABRUZZO - 6 aprile 2009 SCHEDA DI VALUTAZIONE e CENSIMENTO DEI DANNI</p>
<p>OGGETTO: Complesso monumentale e Chiesa di Santa Maria del Suffragio detta delle Anime Sante</p>	
<p>UBICAZIONE: Piazza Duomo, L'Aquila</p>	
<p>PROPRIETA': Curia dell'Aquila</p>	
<p>DESCRIZIONE STORICO-ARTISTICA: Situata sulla piazza principale, l'antica "Piazza del Mercato", la Chiesa di Santa Maria del Suffragio, meglio conosciuta dalla popolazione locale con il nome di "Le Anime Sante", caratterizza il vasto spazio antistante con le sue volumetrie barocche, imponenti e al contempo eleganti, costituendone l'effettivo centro focale. La chiesa nacque idealmente il 30 settembre 1708, allorché la Curia aquilana concesse alla ricca Confraternita di Santa Maria del Suffragio di erigere un nuovo luogo di culto successivamente al crollo della precedente sede, in Via Roio, a causa del devastante terremoto del 1703. La raffinatezza della facciata barocca, completata nel 1775, venne in breve tempo ad eccellere sull'intero disegno della piazza ecclesando lo stesso Duomo, la cui facciata per altro venne terminata solo nel 1928. L'iniziativa di erigere questa chiesa fu di una piccola confraternita laicale, con il sostegno dell'intera comunità cittadina, il cui culto dei morti si era fatto più vivo a seguito del terremoto suddetto che aveva decimato la popolazione.</p>	
<p>LEGAMI STORICI con ALTRE CITTA' o NAZIONI: Legame con Roma perché la chiesa fu edificata dopo il terremoto del 1703 da architetti di scuola romana</p>	
<p>STIMA DEL COSTO DELL'INTERVENTO SOTTO IL PROFILO DEL RESTAURO, DELL'ADEGUAMENTO FUNZIONALE E DEL RESTAURO DEGLI ELEMENTI STORICO-ARTISTICI</p>	
<p>VALUTAZIONE DEL DANNO E STIMA COSTI:</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Collasso del tamburo e della cupola - Collasso della lanterna - Collasso delle aggetti (vela, guglie, pinnacoli, etc.) - Lesioni di grave entità dell'arco trionfale - Lesioni di grave entità con situazione prossima al crollo degli elementi di copertura del presbitero e dell'abside <p style="text-align: center;">Stima economica: € 6.500.000</p> 
<p>TEMPI PREVISTI PER L'ATTUAZIONE:</p>	<p style="text-align: center;">Stima dei tempi dell'intervento: 4 anni</p> 
<p>GRUPPO MISTO DI LAVORO:</p> <p style="text-align: right;">Il Vice Commissario Delegato Ing. Luciano Marchetti</p>	

Appendice D: Accelerogrammi, velocigrammi e sismogrammi delle stazioni AQA, AQK, AQG, AQM, AQV e GSA e rapporti spettrali delle stazioni della valle dell'Aterno

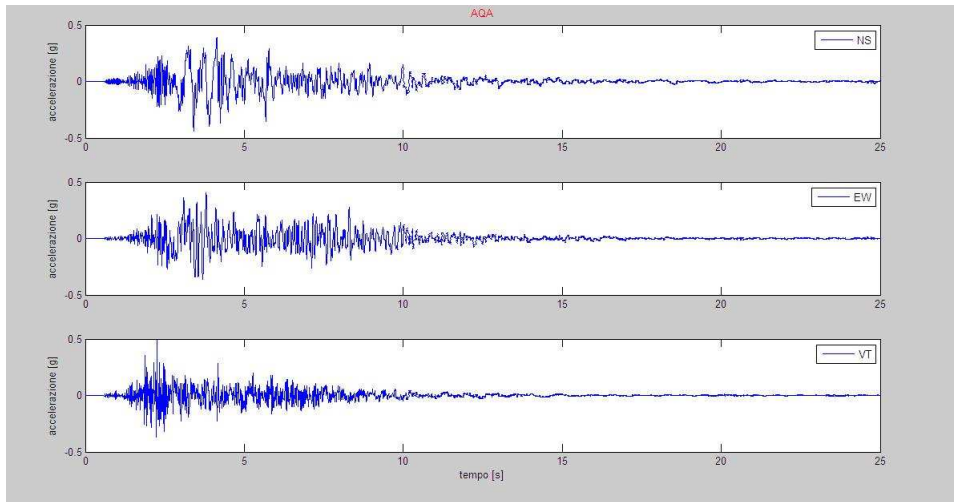


Figura D.1. Accelerogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQA

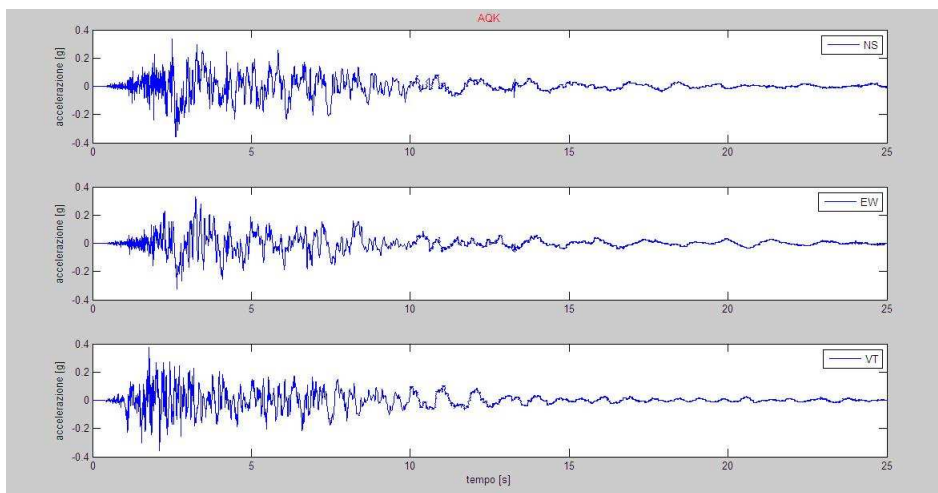


Figura D.2. Accelerogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQK

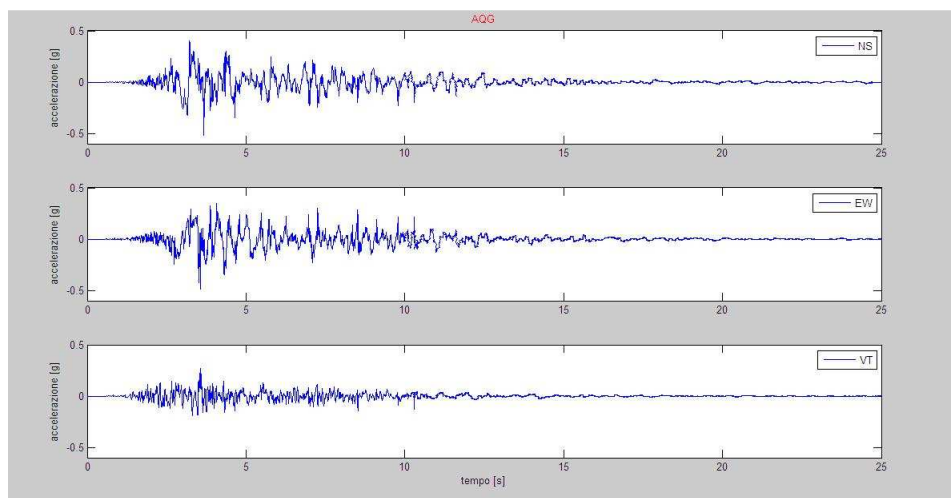


Figura D.3. Accelerogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQG

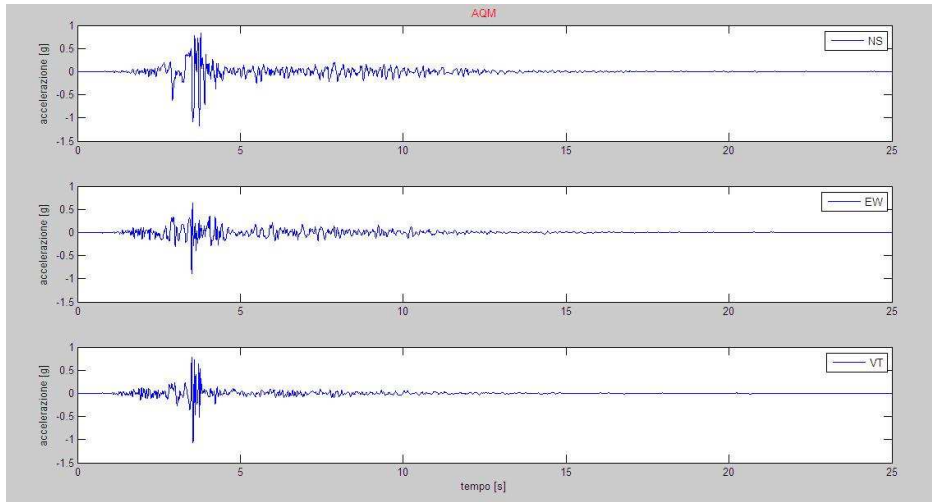


Figura D.4. Accelerogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQM

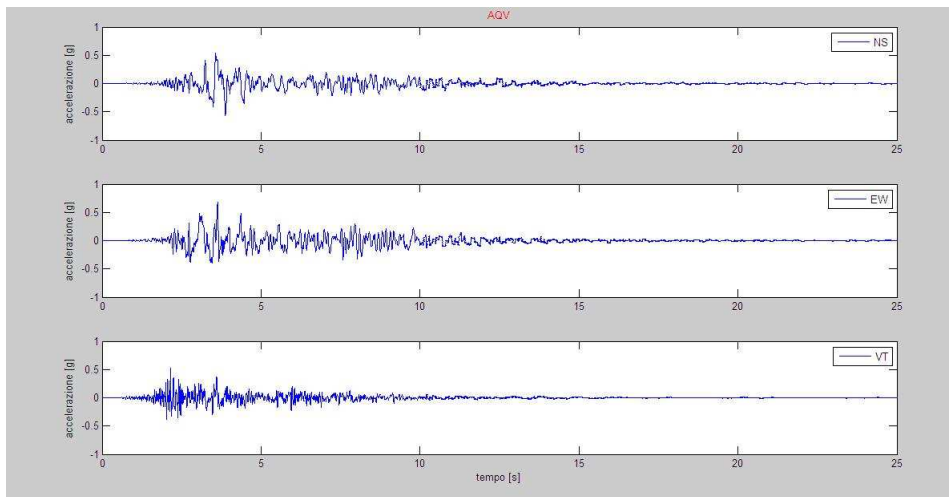


Figura D.5. Accelerogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQV

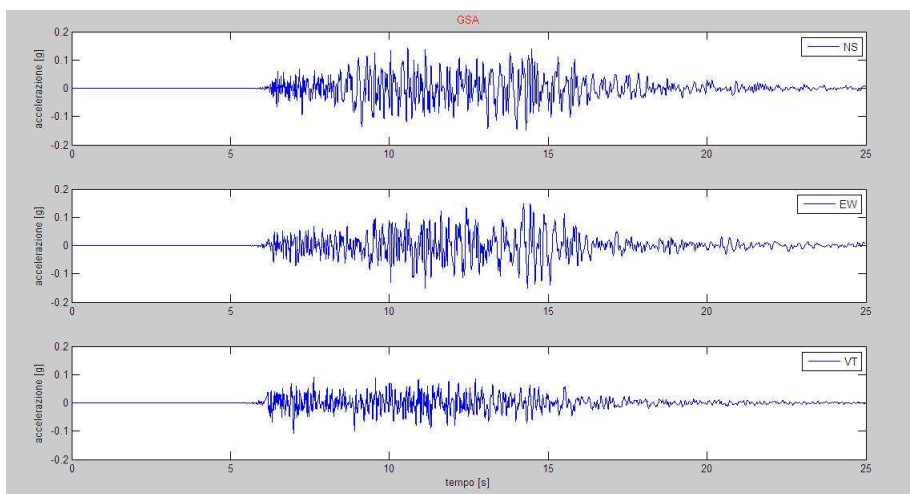


Figura D.6. Accelerogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione GSA

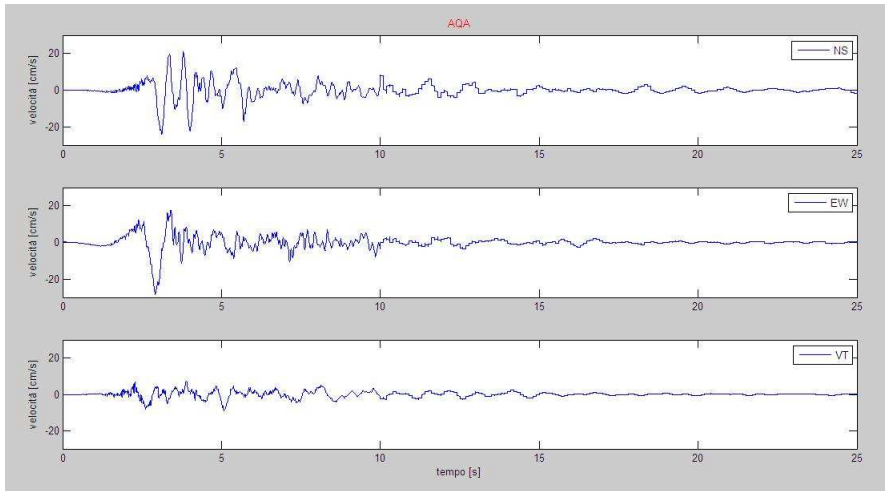


Figura D.7. Velocigrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQA

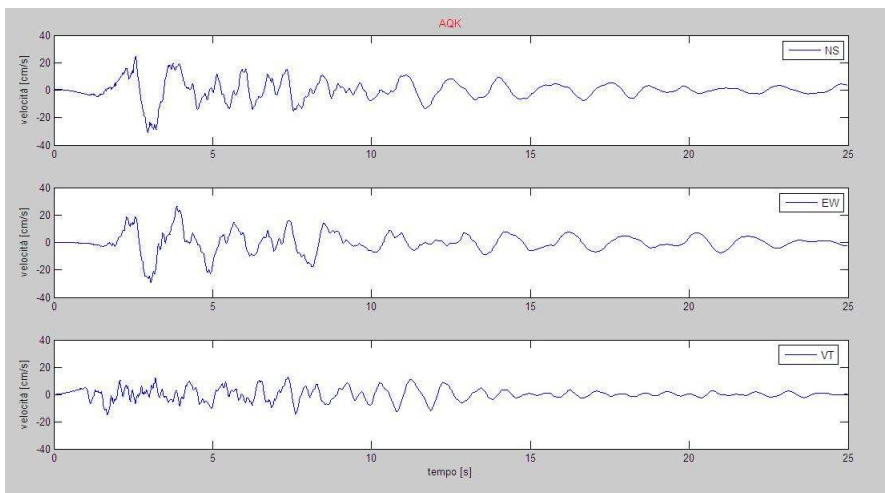


Figura D.8. Velocigrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQK

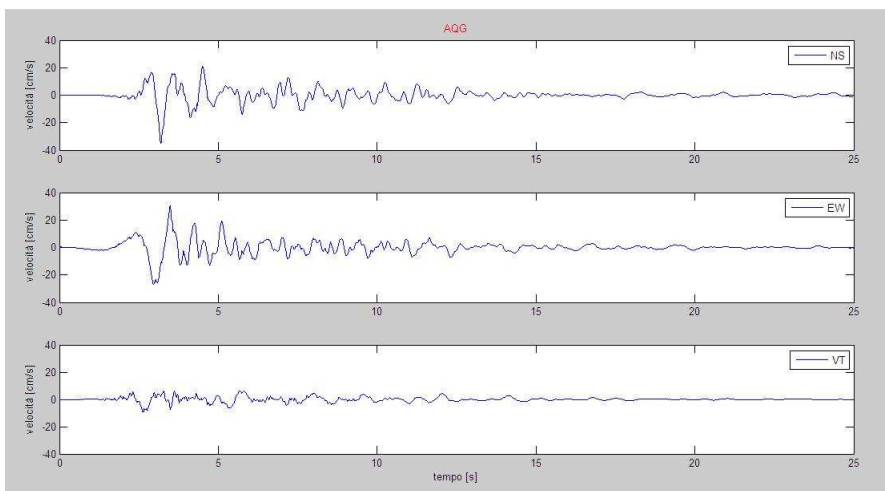


Figura D.9. Velocigrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQG

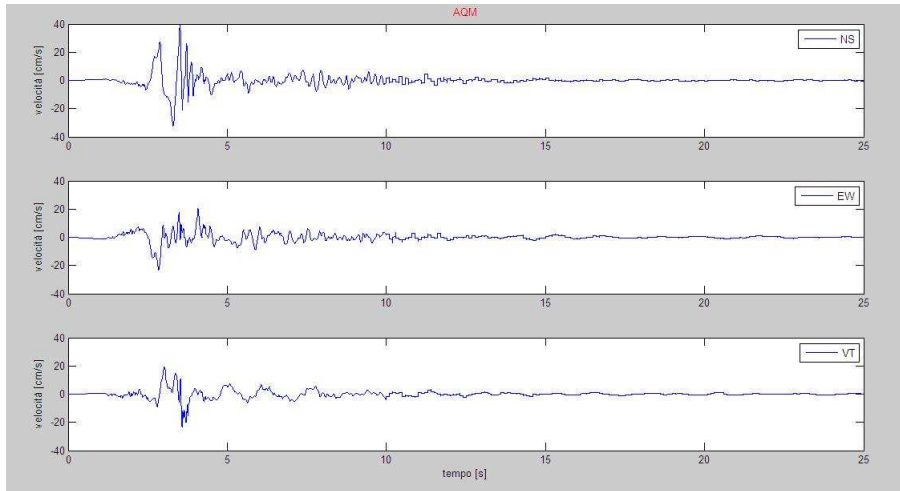


Figura D.10. Velocigrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQM

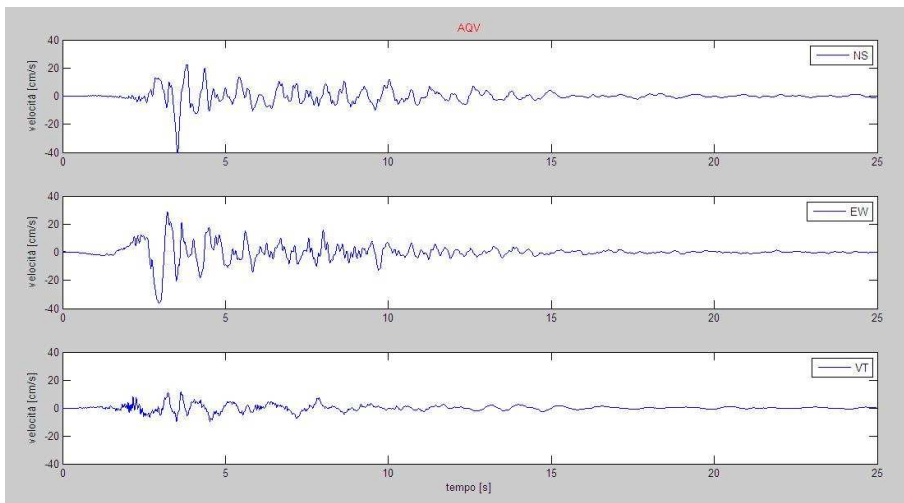


Figura D.11. Velocigrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQV

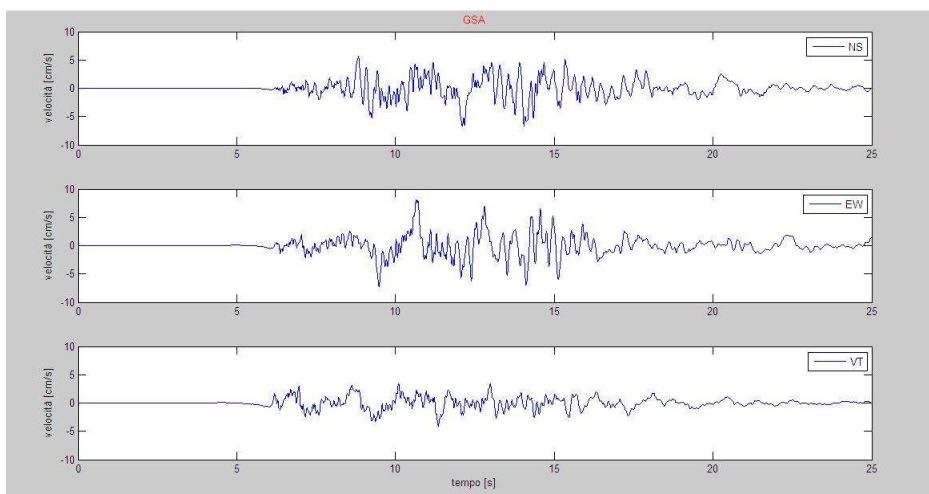


Figura D.12. Velocigrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione GSA

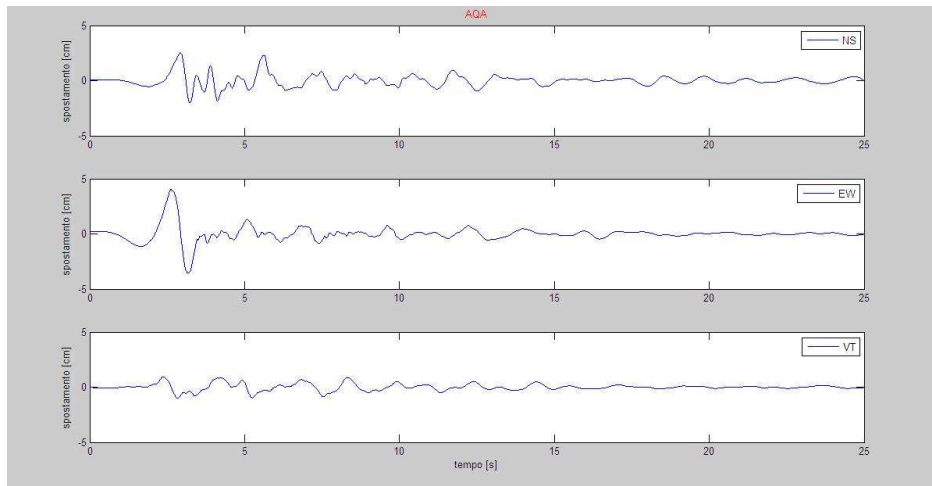


Figura D.13. Sismogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQA

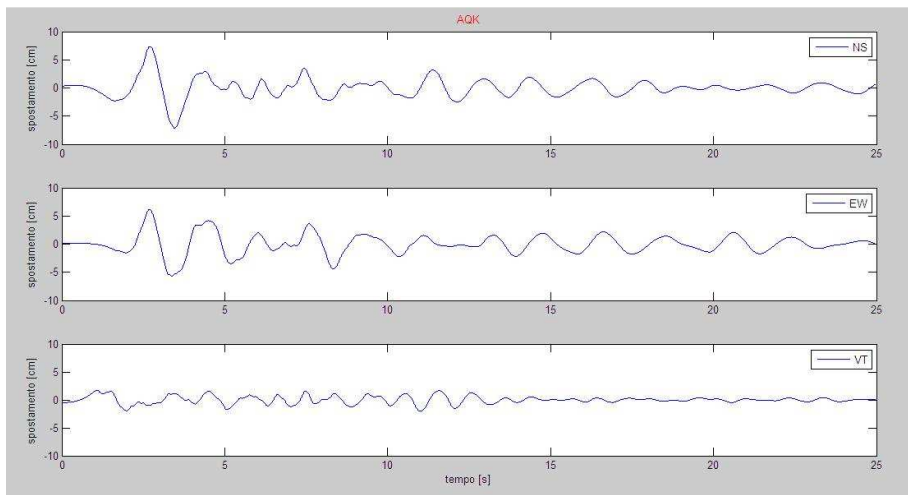


Figura D.14. Sismogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQK

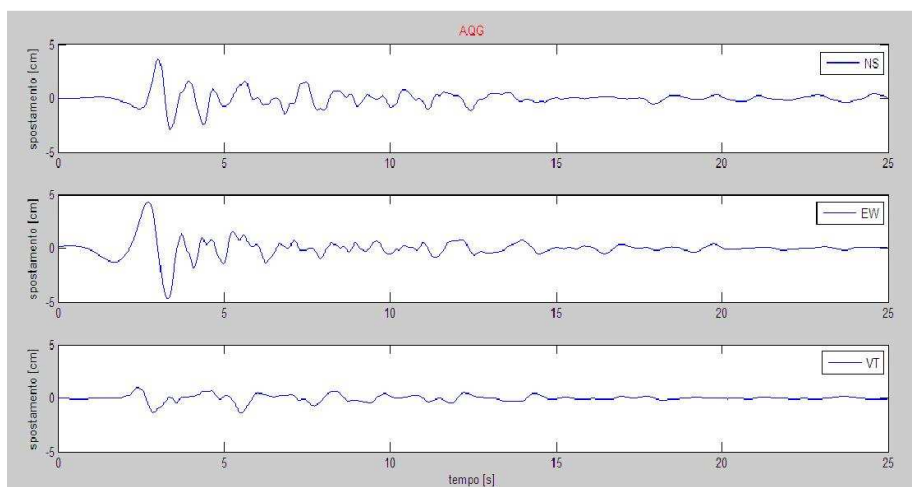


Figura D.15. Sismogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQQ

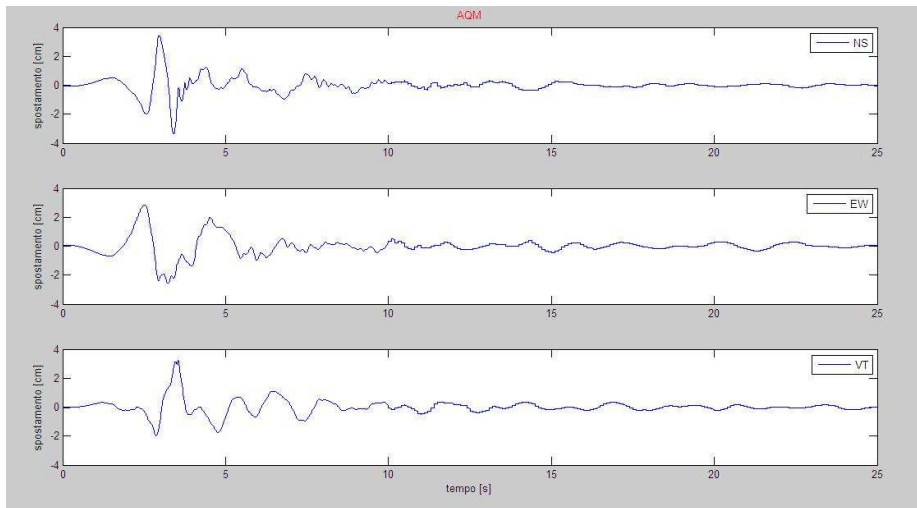


Figura D.16. Sismogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQM

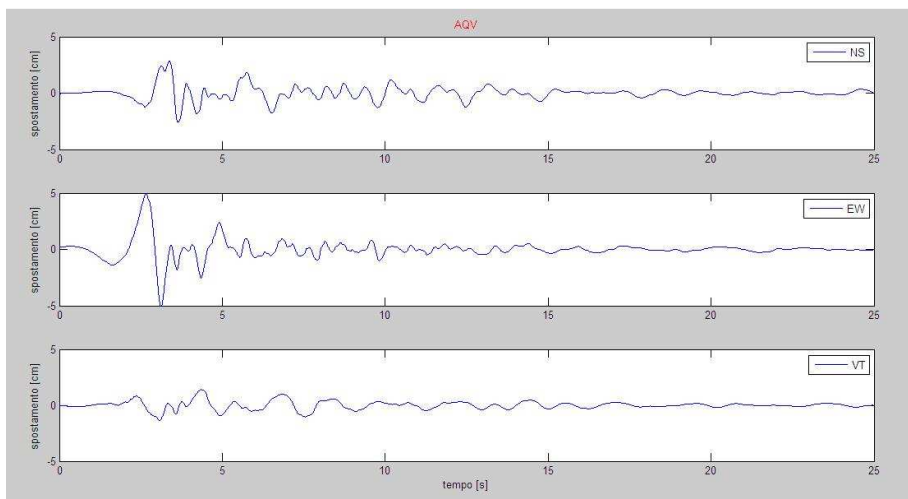


Figura D.17. Sismogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQV

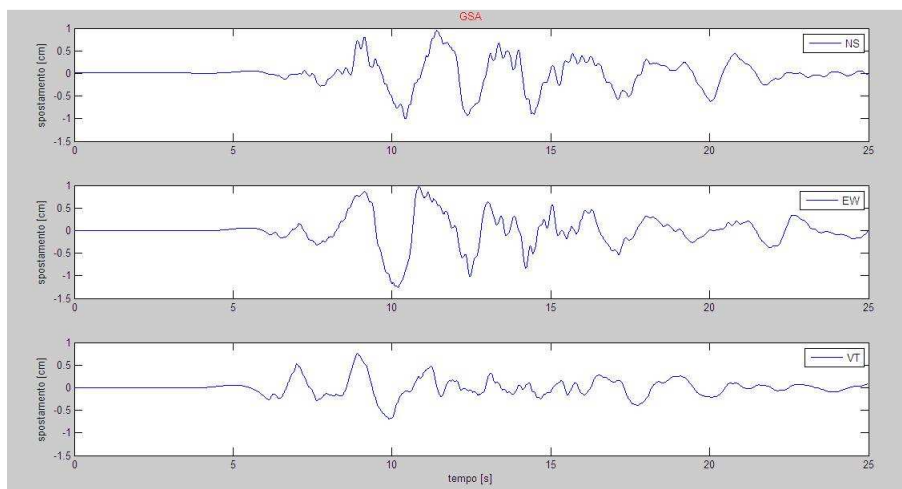


Figura D.18. Sismogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione GSA

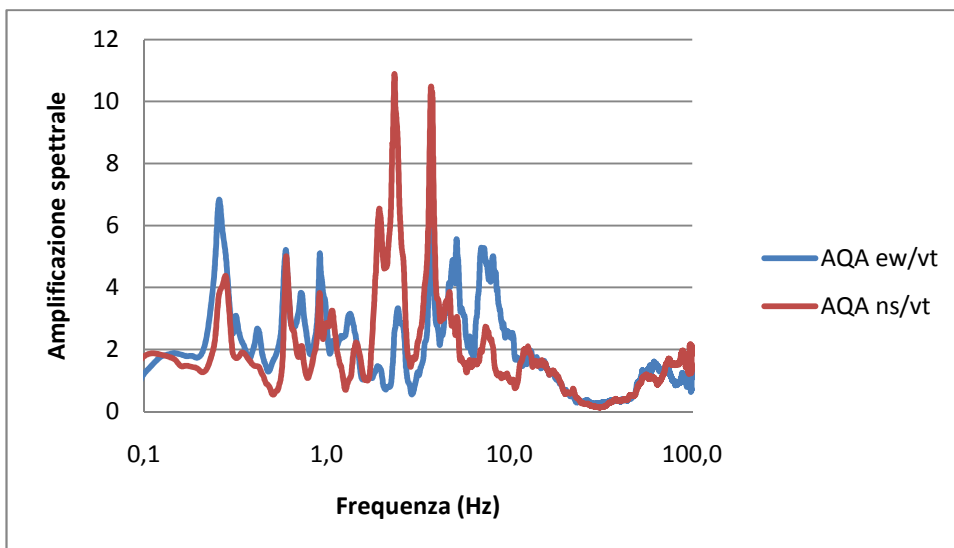


Figura D.19. Rapporti H/V stazione AQA, scossa principale

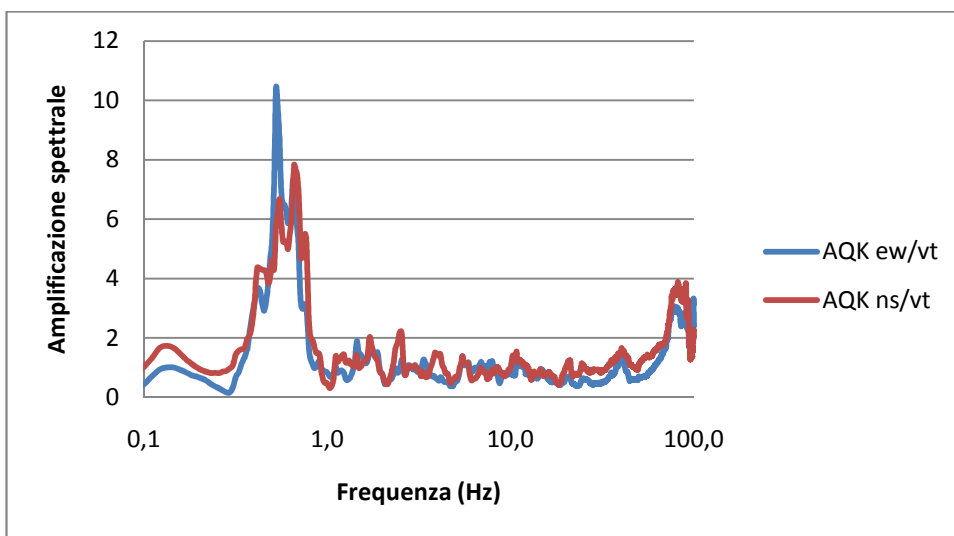


Figura D.20. Rapporti H/V stazione AQK, scossa principale

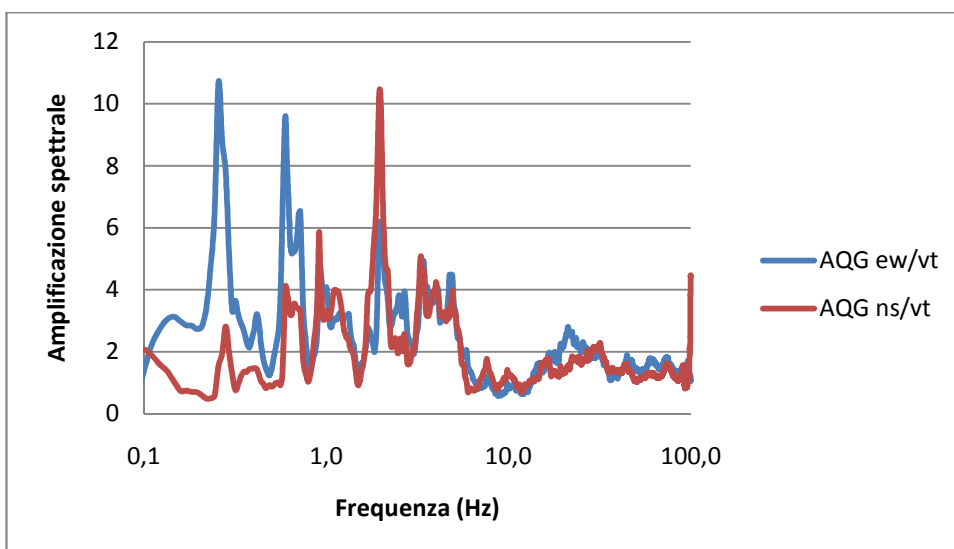


Figura D.21. Rapporti H/V stazione AQG, scossa principale

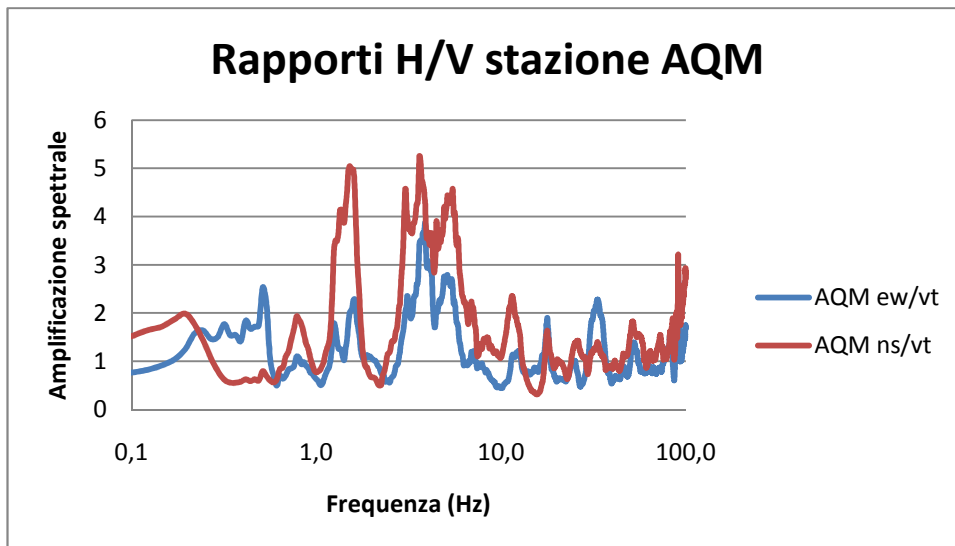


Figura D.22. Rapporti H/V stazione AQM, scossa principale

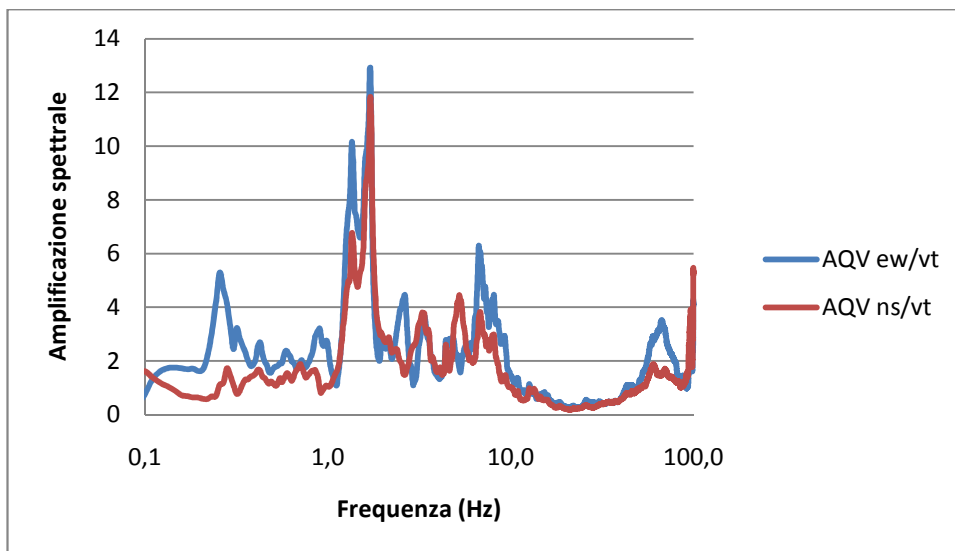


Figura D.23. Rapporti H/V stazione AQV, scossa principale

Indice delle figure

1.1. Casa a San Gregorio, nell'aquilano, Italia (foto di inizio settembre 2009)	pag 8
1.2. Costruzione a Pichidegua, nella zona epicentrale, Cile (foto di inizio marzo 2010)	pag 9
2.1. Localizzazione dell'evento sismico del 6 aprile 2009, L'Aquila	pag 10
2.2. Schematizzazione della sorgente del terremoto: faglia normale di Paganica, responsabile della scossa principale del 6 aprile 2009	pag 11
2.3. L'area de L'Aquila e la localizzazione delle morti	pag 12
2.4. 9 aprile 2009; un secondo evento avvenuto vicino al lago di Campotosto il 9 aprile, la localizzazione è indicata con la stella gialla (Fonte: ISIDE)	pag 14
2.5. Faglie attive nell'area de L'Aquila e localizzazione dei tre eventi principali della sequenza sismica attiva (gruppo di lavoro Emergeo, 2009); i triangoli viola indicano i punti in cui i geologi dell'Emergeo hanno osservato fenomeni cosismici, in particolare fratture del suolo. La freccia nera indica la faglia di Paganica, causa dell'evento del 6 aprile	pag 14
2.6. Disposizione degli epicentri dei pre-eventi e dei post-eventi in superficie (immagine più grande), disposizione degli epicentri in profondità (immagine in alto a sinistra) (fonte: INGV)	pag 15
2.7. Sismicità nell'Appennino centrale negli anni tra il 1980 e il 2008 e localizzazione degli eventi della sequenza sismica attiva (Cocco, Chiarabba e De Gori, 2009)	pag 16
2.8. Sismicità storica degli Appennini centrali vicino a L'Aquila (Rovida et al., 2009)	pag 17
2.9. Rappresentazione schematica del concetto di asperità su di un piano di faglia (Ruiz, 2007)	pag 18
2.10. Diverse distribuzioni di asperità lungo una faglia inclinata (Ruiz, 2007)	pag 19
2.11. Modello della proiezione della superficie di faglia in superficie. I colori sul piano di faglia indicano la distribuzione dello scorrimento. Le linee bianche indicano la posizione della propagazione di rottura a intervalli di 1 secondo. I punti neri indicano le registrazioni delle repliche (da Piatanesi e Cirella, 2009). In blu sono state cerchiare le due aree dove si sono individuati gli scivolamenti maggiori, mentre in rosa le zone in cui si è verificata una maggior densità di repliche (Piatanesi e Cirella, 2009)	pag 20
3.1. Modello geodinamico della zona centrale del Mediterraneo (Devoti et al., 2008)	pag 23
3.2. Distribuzione dei depositi quaternari (in celeste) e meso-cenozoici (in altri colori nella zone A, B e C) nella conca aquilana e nella Valle dell'Aterno (tratta dal Foglio n. 359 "L'Aquila" della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 - APAT, 2006)	pag 25
3.3, 3.4 e 3.5. Evidenza della faglia in superficie sul terreno, una strada e in una casa	pag 27
3.6. Faglie attive presenti nell'area dell'aquilano, nella zona più prossima alla città de L'Aquila. Sono evidenziate le faglie di Paganica, Bazzano e Pettino (Di Capua et al., 2009)	pag 28
3.7. Sezione verticale della zona dell'aquilano in cui viene messo in evidenza il sistema di faglie normali. La faglia segnata in rosso è la Paganica	pag 28
3.8. In rosso è tracciata la faglia di Paganica, in nero i punti in cui si sono osservate evidenze di faglia in superficie. I due elementi, considerando una zona di rispetto di 100 m, sono coincidenti	pag 29
3.9. Tassi di deformazione annua nel centro Italia determinati da strumento GPS, dati acquisiti dalla rete RING GPS (INGV)	pag 30
3.10. Dati GPS: a sinistra spostamenti orizzontali previsti (in rosso) ed osservati (in giallo), a destra movimenti verticali e la soluzione proposta del piano di faglia (modificata da D'Agostino 2009)	pag 30
3.11. Interferogramma svolto partendo dalle immagini del Cosmo-SkyMed del 19 febbraio e 9 aprile (Emergeo Working Group, 2009)	pag 31

3.12. Rappresentazione del piano di faglia (Fonte: INGV)	pag 32
3.13. Frange interferometriche di spostamenti co-sismici (modificata da Salvi et al.,2009). La linea nera indica l'allineamento delle rotture del terreno associate alla faglia di Paganica. La discontinuità segnata con la linea rossa corrisponde alla faglia di Bazzano-Fossa	pag 33
4.1. Dettaglio di un edificio del diciottesimo secolo (tratta dal report di EERI, giugno 2009)	pag 36
4.2. Struttura in cemento armato vicino alla stazione ferroviaria de L'Aquila con danni ai muri esterni ma struttura intatta (foto di inizio settembre 2009)	pag 37
4.3. Localizzazione di alcuni paesi danneggiati in seguito al terremoto del 6 aprile	pag 40
4.4. Distribuzione delle intensità macrosismiche rilevate dal QUEST in occasione del terremoto del 6 aprile 2009. La stella vuota è l'epicentro macrosismico calcolato mediante l'algoritmo Boxer (Gasparini, 2004). Quella piena è l'ipocentro strumentale (INGV, 2009). Le linee in grigio rappresentano il sistema di faglie di Paganica-San Demetrio, responsabile del terremoto (faglia normale immergente a SW, caratterizzata per tutta la sua lunghezza da fratture superficiali e/o rigetti massimi di 10-15 cm). Notare come l'area mesosismica sia quasi interamente sviluppata nel tetto della faglia ed anche il marcato effetto di direttività della rottura, evidenziata dall'estensione verso SE delle intensità più elevate, dall'ipocentro nella conca aquilana sino a quella subéquana (Castelvecchio Subéquo-Goriano Sicoli)	pag 41
4.5. Distribuzione delle intensità macrosismiche del terremoto del 6 aprile 2009 (cerchi proporzionali all'intensità locale). L'immagine a colori sottostante è un'interpolazione dei dati puntuali di intensità e suggerisce l'estensione generale del danneggiamento (scala cromatica a sinistra). La stella indica l'epicentro macrosismico (in giallo l'ipocentro strumentale). In nero è tracciato un poligono che approssimativamente separa la zona danneggiata da quella che non ha presentato danni; il punto di incontro delle linee in rosso indica la localizzazione delle stazioni della valle dell'Aterno (AQA, AQG, AQM, AQV). Fonte: INGV	pag 42
4.6. Mappa con indicati i paesi che hanno presentato un grado di intensità macrosismica 9 o 9,5 (segnati in rosa), l'epicentro (in rosso), le stazioni di registrazione (in giallo) e la traccia dell'area della proiezione della faglia in superficie (in verde). Si noti che, ad esclusione di Castelnuovo, tutti gli altri paesi si trovano a breve distanza dalla linea della faglia in superficie	pag 43
4.7 Mappa del risentimento macrosismico MCS aggiornata al 17 febbraio 2009 (sito www.haisentitoilterremoto.it)	pag 44
5.1 Ubicazione geografica dei paesi analizzati. Tra parentesi il valore dell'intensità macrosismica MCS (stabiliti dal gruppo QUEST, INGV). I colori dei segni indicano i diversi livelli di I_{MCS}	pag 46
5.2 Mappa della città de L'Aquila con le curve di livello	pag 47
5.3. Chiesa di Santa Maria del Suffragio con la cupola in fase di ristrutturazione dopo i danni subiti in seguito al terremoto del 6 aprile (foto di inizio settembre 2009)	pag 48
5.4. Stazione dei bus posta ai piedi della collina contenente il centro storico	pag 49
5.5. Mappa del centro della città de L'Aquila. I numeri in rosso corrispondono alle foto presentate in seguito, i numeri in blu i gradi di danno degli edifici analizzati	pag 50
Da 5.6 a 5.22. Danni a L'Aquila	pag 51
5.23. Hotel Duca degli Abruzzi (in alto dopo la scossa del 6 aprile, in basso prima della scossa) situato in Viale Giovanni XXIII a L'Aquila	pag 57
5.24. Chiesa di Santa Maria del Suffragio prima della scossa del 6 aprile (a sinistra) e dopo (a destra)	pag 59
5.25. Sezione geologica della collina (Bosi e Bertini, 1970)	pag 60
5.26. Mappa geologica di Castelnuovo (Bertini et al., 1989)	pag 60

5.27. Collasso di alcune abitazioni della parte alta del paese di Castelnuovo. In questa zona le strutture sono principalmente in muratura in pietra grezza (a sacco di ciottoli, pietrame, mista) (foto di inizio settembre 2009)	pag 61
5.28. Alcune abitazioni della zona bassa di Castelnuovo. In questa parte del paese si trovano sia costruzioni in pietra grezza che in pietre squadrate (foto di inizio settembre 2009)	pag 62
Da 5.29 a 5.34. Danni a Castelnuovo	pag 62
5.35. Affioramenti di calcare Giurassico	pag 64
5.36 e 5.37. Danni a Monticchio	pag 65
5.38. Mappa geologica di San Gregorio (Bosi e Bertini, 1970)	pag 66
5.39. Esempi di danni gravi ad edifici in cemento armato a San Gregorio	pag 67
Da 5.40 a 5.42. Danni a San Gregorio	pag 67
5.43. Chiesa a Paganica in fase di ristrutturazione (foto di inizio settembre 2009)	pag 69
5.44. Danni a Paganica	pag 69
5.45. Danni a Coppito	pag 70
6.1. Localizzazione indicativa delle 57 stazioni di registrazione del terremoto del 6 aprile 2009	pag 71
6.2. Carta geologica della Valle dell’Aterno in corrispondenza di L’Aquila (INGV)	pag 72
6.3. Postazione accelerometrica AQK (dietro la stazione dei bus)	pag 73
6.4. Affioramenti nelle vicinanze della postazione accelerometrica AQK	pag 73
6.5. Postazioni accelerometriche AQA, AQF, AQG, AQM e AQV nella Valle dell’Aterno. Le frecce indicano il tracciato della Faglia di Pettino	pag 74
6.6. Posizione delle stazioni aventi le registrazioni accelerometriche. In rosso è indicato l’epicentro della scossa principale del 6 aprile, il rettangolo in verde è la proiezione della faglia in superficie	pag 75
6.7. Posizione delle stazioni situate nel comune de L’Aquila. In rosso è indicato l’epicentro della scossa principale del 6 aprile 2009	pag 75
6.8. Accelerogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQK	pag 78
6.9. Velocigrammi delle stazioni AQK, AQG e AQV	pag 79
6.10. Ubicazione delle stazioni AQA, AQG, AQK, AQM e AQV e relativi sismogrammi (dir. EW)	pag 79
6.11. Rappresentazione schematica dell’asperità (Scholz, 1990)	pag 80
6.12. Terremoto del Cile centrale 1985. A destra: proiezione in superficie degli spostamenti permanenti osservati; i punti corrispondono alla localizzazione delle stazioni di registrazione (Barrientos 1988), le linee a tratti corrispondono alla proiezione in superficie dello slip del terremoto in cm. A sinistra: sismogrammi di San Isidro e San Felipe per il terremoto del Cile centrale del 1985; gli impulsi identificati sono stati cerchiati, gli impulsi nelle due registrazioni hanno forme simili	pag 81
6.13. Distribuzione dello scorrimento sismico indicato coi diversi colori ed individuazione del piano di faglia (Cirella at al. 2009). L’incrocio delle due rette in rosso rappresenta la locazione delle stazioni AQA, AQG, AQM e AQV. Le linee bianche rappresentano la posizione della propagazione della rottura in un intervallo di 1 s. La stella rossa corrisponde alla posizione dell’epicentro della scossa principale e le altre stelle gli epicentri delle repliche più importanti, mentre i punti in nero corrispondono agli epicentri delle altre repliche registrate	pag 82
6.14. Ubicazione delle stazioni AQA, AQG, AQM e AQV, relativi accelerogrammi e valori dei PGA in direzione vt (PGAaqm=1,060g; PGAaqv=0,518g; PGAaqa=0,489g; PGAaqg=0,273g)	pag 83
6.15. Sovrapposizione del primo impulso dello spostamento per le stazioni AQG, AQV, AQK (dir. EW)	pag 84
6.16. Impulso (in direzione ew) rappresentativa della prima asperità per le 6 stazioni in analisi	pag 85
6.17. Accelerogramma e sismogramma in direzione ew stazione AQA	pag 85

6.18. Rappresentazione dell'impulso probabilmente causato dalla prima asperità nelle 5 stazioni più prossime all'epicentro	pag 86
6.19. Distanze sorgente-sito considerate nelle diverse relazioni di attenuazione	pag 87
6.20. Distribuzione dei dati rispetto alla magnitudo, distanza, classificazione del sito e tipo di faglia	pag 89
6.21. Geometria della faglia tracciata rispetto agli eventi principali. I triangoli mostrano le stazioni sismiche della RAN installate nell'area epicentrale	pag 90
6.22. Confronto tra i dati della scossa principale del terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009 e la relazione di attenuazione Akkar-Bommer	pag 91
6.23. Spettri di risposta delle cinque stazioni più prossime all'epicentro (direzione ew)	pag 92
6.24. Spettri di risposta delle cinque stazioni più prossime all'epicentro (direzione ns)	pag 93
6.25. Spettri di risposta delle cinque stazioni più prossime all'epicentro (direzione vt)	pag 94
6.26. Confronto tra lo spettro di risposta totale della stazione AQA in direzione ew e lo spettro corrispondente solo alla parte riguardante l'influenza della prima asperità	pag 95
6.27. Spettri di spostamento per le cinque stazioni più prossime all'epicentro (direzione ew)	pag 96
6.28. Spettri di spostamento per le cinque stazioni più prossime all'epicentro (direzione ns)	pag 96
6.29. Spettri di spostamento per le cinque stazioni più prossime all'epicentro (direzione vt)	pag 97
6.30. Rapporti H/V stazione AQK, scossa principale	pag 98
6.31. Accelerogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQM	pag 99
6.32. Spettro di risposta stazione AQM direzione verticale	pag 100
7.1. Illustrazione del valore di v_0	pag 103
7.2. Relazione tra il potenziale distruttivo orizzontale e l'intensità macrosismica per il terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009	pag 106
7.3. Comparazione tra le diverse scale di intensità macrosismica (Medvedev et al., 1963)	pag 106
7.4. Relazione tra il potenziale distruttivo orizzontale e l'intensità macrosismica per il terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009; l'Intensità Macrosismica per la stazione AQK è stata modificata ad un valore 7	pag 107
7.5. Stazioni accelerometriche del terremoto dell'Irpinia del 23 novembre 2009	pag 111
7.6. Valori del P_D nel tempo considerando i maggiori eventi sismici italiani degli ultimi anni	pag 112
7.7. Numero delle stazioni che hanno registrato gli eventi sismici in considerazione	pag 112
7.8. Confronto dell'andamento di diversi parametri rappresentativi del danno sismico; i valori sono stati normalizzati. Sull'asse delle ascisse vi sono i codici di 6 eventi posti in ordine decrescente secondo il livello di danno osservato da Bertero direttamente in sito. (Le componenti delle registrazioni prese in considerazione sono: CH:(3 marzo, 1985) Lollole ,componente N10°E; EC:(18 maggio 1940) El Centro,componente NS; MX:(19 settembre 1985) SCT, componente EW; SS:(10 ottobre 1986) CIG, componente EW; TF:(21 luglio 1952) Taft, componente N21°E; MO:(12 giugno 1978)Tohuku Sendai City,componente NS)	pag 115
7.9. Confronto delle grandezze rappresentative del danno (Potenziale di Distruttività orizzontale, intensità di Arias e accelerazione massima)	pag 116
8.1. Movimento di subduzione della placca di Nazca sotto la placca Sudamericana	pag 118
8.2. Ubicazione della zona epicentrale del terremoto del 27 febbraio 2010 e delle regioni colpite dai principali terremoti passati; USGS	pag 119
8.3. Distribuzione temporale delle repliche in funzione della magnitudo (solamente gli eventi con magnitudo superiore a 4,7; riquadro superiore) e numero di scosse al giorno che sono state registrate fino al 36° giorno dopo l'evento principale (fino al 3 aprile). I dati riguardanti le magnitudo sono stati stabiliti dal Centro Nacional de Informacion Sismica (NEIC) del Servicio Geologico degli Stati Uniti (USGS)	pag 120

8.4. Movimento co-sismico della scossa principale del 27 febbraio 2010; USGS	pag 121
8.5. Rappresentazione preliminare della localizzazione delle due asperità appartenenti alla faglia. La stella rossa rappresenta l'epicentro della scossa principale; gentilmente fornita da R. Saragoni	pag 121
8.6. Accelerogramma della stazione di Maipù, Santiago; Renadic	pag 122
8.7. Accelerogrammi della stazione del Colegio San Pedro a Concepcion	pag 123
8.8. Ubicazione delle tre stazioni considerate, delle quali si hanno a disposizione le registrazioni (in data luglio 2010)	pag 123
8.9. Spettri di risposta delle cinque stazioni più prossime all'epicentro del terremoto de L'Aquila e della stazione situata a Concepcion per il terremoto del Cile (direzione ew)	pag 125
8.10. Spettri di risposta delle cinque stazioni più prossime all'epicentro del terremoto de L'Aquila e della stazione situata a Concepcion per il terremoto del Cile (direzione ns)	pag 125
8.11. Spettri di risposta delle cinque stazioni più prossime all'epicentro del terremoto de L'Aquila e della stazione situata a Concepcion per il terremoto del Cile (direzione vt)	pag 125
8.12. Confronto tra il potenziale distruttivo del terremoto del Cile (punti blu) con quello de L'Aquila (croci viola). La retta azzurra indica l'andamento generale studiato da Araya e Saragoni	pag 126
8.13. Mappa delle intensità del terremoto del 1985 in Cile (Wood et al., 1987). Coordinate epicentrali: -33° 06' 0", -71° 54' 0" (fonte: Departamento de Geofisica, Universidad de Chile)	pag 129
8.14. Localizzazione degli epicentri del terremoto del 27 febbraio 2010 e di quello del 3 marzo 1985, in giallo sono indicate la stazione di Melipilla e la città di Santiago come punto di riferimento. Distanza epicentro del 1985-stazione di Melipilla: 95 km, distanza epicentro del 2010-stazione di Melipilla: 265 km (fonte: sito COSMOS)	pag 130
8.15. Accelerogrammi registrati nella stazione di Melipilla in direzione ns, durante il terremoto del 27 febbraio 2010 (in alto) e del 3 marzo 1985 (in basso) (accelerogrammi forniti personalmente dall'ingegnere S. Ruiz dell'Universidad de Chile)	pag 130
8.16. Spettri di risposta della staz. di Melipilla per il terremoto del 1985 e del 2010 in Cile (dir. NS)	pag 131
8.17. Esempio di una casa in adobe con danno di grado 5. Foto scattata a Pichidegua circa 10 giorni dopo la scossa del 27 febbraio	pag 132
8.18. Esempio di una casa in muratura povera, essendo confinata ha retto ottimamente senza presentare alcun danno. Foto scattata a Santiago il giorno stesso della scossa principale	pag 133
8.19. Intensità e isosisme della zona danneggiata in seguito al terremoto del 27 febbraio 2010; M. Astroza – S. Ruiz	pag 134
8.20 e 8.21. Rancagua. Edificio di 14 piani degli anni '60. Danno di grado 1 (a sinistra) Particolare dell'edificio di 14 piani: il piano terra debole (a destra)	pag 136
8.22 e 8.23. Machalì. Casa in adobe. Danno di grado 5. Casa in adobe. Danno di grado 3	pag 136
8.24. Coltauco. Casa in adobe. Danno di grado 4	pag 137
8.25. Las Cabras. Casa in adobe. Danno di grado 2	pag 137
8.26 e 8.27. Peumo. Particolare di una casa in adobe con danno di grado 3 (a sinistra) Casa in adobe. Danno di grado 3 (a destra)	pag 138
8.28, 8.29 e 8.30. Pichidegua. Scuola in cemento armato (in alto) Ingresso della scuola; si è sganciato dal muro e si è spostato di circa 50 cm (in basso a destra) Casa di mattoni (in basso a sinistra)	pag 139
8.31. Marchihue. Casa in muratura confinata. Danno di grado 0	pag 139
8.32 e 8.33. Comune di Peralillo, completamente collassato (a sinistra) Da destra: Casa in adobe (danno di grado maggiore o uguale a 3), Casa in muratura (danno di grado 2), Casa in adobe (danno di grado 5) (a destra)	pag 140
8.34. Paredones. Casa in adobe di due piani. Danno di grado 2	pag 140

8.35 e 8.36. Santa Cruz. Casa in mattoni, caduta del solaio. Danno di grado 2 Casa in adobe, tetto rifatto in seguito al terremoto del 1985. Danno di grado 1	pag 141
8.37 e 8.38. Nancagua. Chiesa in mattoni (a sinistra) Campanile della chiesa in mattoni (a destra)	pag 141
8.39 e 8.40. San Fernando. Casa in adobe. Danno di grado 4 (a sinistra) Casa in muratura confinata. Danno di grado 1 (a destra)	pag 142
8.41. Edificio del 1915. Danno di grado 2	pag 142
8.42. Chimbarongo. Comignolo integro	pag 142
8.43. Romeral. Case in adobe con tetto in metallo. Danno di grado 2	pag 143
8.44 e 8.45. Licantén. Casa in muratura costruita su di un terreno di riporto. Danno di grado 5 (a sinistra) Casa in muratura. Danno di grado 1 (a destra)	pag 143
8.46 e 8.47. Curepto. Casa di muratura confinata. Danno di grado 1 (a sinistra) Case in adobe costruite al lato del fiume. Danno di grado 5 (a destra)	pag 144
8.48, 8.49 e 8.50. Talca. Hotel Terranova (in alto a sinistra) Casa in muratura. Danno di grado 4 (in basso) Edificio di 18 piani. Danno di grado 1 (in alto a destra)	pag 145
8.51. Penciahue. Casa in adobe con supporti laterali in cemento. Danno di grado 2	pag 145
8.52. Mappa del centro di Constitucion. In rosso sono indicati i luoghi in cui sono state scattate le foto presentate (1 figura 8.53, 2 figura 8.54 e 3 figura 8.55)	pag 146
8.53, 8.54 e 8.55. Constitucion. Zona alta della città rispetto alla piazza (in alto a sinistra) Zona bassa della città rispetto alla piazza (in alto a destra) Casa in muratura della parte bassa della città. Danno di grado 1 (in basso)	pag 147
8.56. Santiago centro e dintorni. I numeri corrispondono alle zone visitate: 1 Cerro Navia, 2 Lo Prado, 3 Universitario, 4 Brasil, 5 Yungay, 6 Independencia, 7 Maipù	pag 148
8.57. Tipica casa comunale in muratura confinata. Non presenta alcun danno	pag 148
8.58. Casa in adobe nel quartiere universitario di Santiago. Danno di grado 1	pag 149
8.59. Danno ricorrente consistente nella caduta del parapetto. Foto scattata a Santiago il giorno stesso del terremoto	pag 149
8.60 e 8.61. Particolari di un edificio di 20 piani con pareti di taglio Livello scantinato dell'edificio	pag 150
8.62. Visione in pianta dei pilastri che sorreggono l'edificio Don Luis di Maipù	pag 150
8.63 e 8.64. Edificio Don Luis gravemente danneggiato. Danno grado 5 (a sinistra) Edificio Don Tristan gravemente danneggiato. Danno grado 5 (a destra)	pag 151
8.65 e 8.66. Danni ai pilastri dell'edificio Don Luis a Maipù	pag 151
8.67. Sovrapposizione dell'accelerogramma registrato a Concepcion (stazione CCSP) e registrato a L'Aquila (stazione AQV) rispettivamente per il terremoto del Cile e dell'Italia. Lo scopo è quello di sottolineare la differenza della durata delle due scosse	pag 153
8.68. Confronto tra la dimensione della faglia de L'Aquila e quella del Cile	pag 154
B.1. Classificazione del danno alle strutture in muratura nella scala EMS98. Da Grunthal (1998)	pag 163
B.2. Classificazione del danno alle strutture in CA nella scala EMS98. Da Grunthal (1998)	pag 164
D.1. Accelerogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQA	pag 166
D.2. Accelerogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQK	pag 166
D.3. Accelerogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQG	pag 166
D.4. Accelerogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQM	pag 167
D.5. Accelerogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQV	pag 167
D.6. Accelerogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione GSA	pag 167
D.7. Velocigrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQA	pag 168
D.8. Velocigrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQK	pag 168

D.9. Velocigrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQG	pag 168
D.10. Velocigrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQM	pag 169
D.11. Velocigrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQV	pag 169
D.12. Velocigrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione GSA	pag 169
D.13. Sismogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQA	pag 170
D.14. Sismogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQK	pag 170
D.15. Sismogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQG	pag 170
D.16. Sismogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQM	pag 171
D.17. Sismogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione AQV	pag 171
D.18. Sismogrammi in direzione nord-sud, est-ovest e verticale; stazione GSA	pag 171
D.19. Rapporti H/V stazione AQA, scossa principale	pag 172
D.20. Rapporti H/V stazione AQK, scossa principale	pag 172
D.21. Rapporti H/V stazione AQG, scossa principale	pag 172
D.22. Rapporti H/V stazione AQM, scossa principale	pag 173
D.23. Rapporti H/V stazione AQV, scossa principale	pag 173

Indice delle tabelle

2.1. Parametri della scossa principale e dei principali eventi secondari (Fonte : INGV)	pag 13
2.2. Parametri della sorgente responsabile del terremoto del 6 aprile 2009	pag 21
5.1. Distribuzione del danno secondo la scala europea delle intensità (intensità MSK)	pag 58
6.1. Elenco delle stazioni di registrazione e relativo anno di installazione (Fonte: INGV)	pag 72
6.2. Caratteristiche geografiche e proprietà del suolo delle 18 stazioni più prossime all'epicentro	pag 74
6.3. Stazioni più prossime all'epicentro aventi le registrazioni della scossa principale (ITACA), ordinate secondo il valore del raggio epicentrale	pag 76
6.4. Valori dell'accelerazione di picco nelle tre direzioni nord-sud, est-ovest e verticale	pag 77
6.5. Valori della velocità di picco nelle tre direzioni nord-sud, est-ovest e verticale. Dati non corretti	pag 80
6.6. Valori dello spostamento di picco nelle tre direzioni nord-sud, est-ovest e verticale	pag 80
6.7. Statistica degli eventi in termini di magnitudo e classi di sito	pag 89
6.8. Accelerazione di picco e R_{jb} di ogni stazione della RAN	pag 90
6.9. Valore dell'accelerazione spettrale massima per ogni registrazione considerata (direzione ew)	pag 92
6.10. Valori dei periodi dell'impulso dalla faglia (T_f) e dei periodi del suolo (T_s) per le cinque stazioni più prossime all'epicentro	pag 93
6.11. Valore dell'accelerazione spettrale massima per ogni registrazione considerata (direzione ns)	pag 93
6.12. Valore dell'accelerazione spettrale massima per ogni registrazione considerata (direzione vt)	pag 94
6.13. Valore dello spostamento massimo per ogni registrazione considerata (direzione ew)	pag 96
6.14. Valore dello spostamento massimo per ogni registrazione considerata (direzione ns)	pag 96
6.15. Valore dello spostamento massimo per ogni registrazione considerata (direzione vt)	pag 97
6.16. Valori delle accelerazioni per $T=0$ e in corrispondenza del primo picco	pag 100
7.1. Valori del Potenziale Distruttivo delle 17 stazioni accelerometriche principali per il terremoto del 6 aprile 2009 e relativi dati aggiuntivi, per le due componenti orizzontali e per la componente verticale. Sono	

indicati il nome della località in cui si trova la stazione di registrazione ed il valore dell'intensità macrosismica attribuitogli dall'INGV	pag 104
7.2. Registrazioni dei terremoti italiani principali degli ultimi anni, ordinati secondo i valori del P_D . In nero sono segnate le stazioni posizionate su suolo di tipo A, in blu su suolo B e in rosso su suolo C. Le stazioni del terremoto de L'Aquila del 2009 sono evidenziate in rosa, quelle riguardanti il terremoto dell'Irpinia del 1980 in azzurro. Dati e valori ottenuti direttamente dal Dr. Mollaioli F. (Università di Roma, La Sapienza)	pag 108
7.3. Valori del P_D dei principali terremoti italiani a partire dal 1976 (fonte: INGV)	pag 112
8.1. Valori dell'accelerazione massima orizzontale e verticale (senza correzioni) riportati dalla Rete del Dipartimento di Ingegneria Civile della Università de Chile (www.renadic.cl) fino al 5 aprile	pag 122
8.2. Valore maggiore di accelerazione spettrale e corrispondente periodo per le tre registrazioni del terremoto del Cile	pag 124
8.3. Valori dei periodi dell'impulso dalla faglia (T_f) e dei periodi del suolo (T_s) per le tre direzioni della stazione di Concepcion	pag 124
8.4. Valori dei P_{dh} per tre stazioni che hanno registrato il terremoto del 27 febbraio 2010 in Cile e delle registrazioni riguardanti il terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009	pag 126
8.5. Caratteristiche principali delle sorgenti dei terremoti del 1985 e 2010 (fonte: COSMOS e USGS)	pag 131
8.6. Nome, raggio epicentrale, intensità macrosismica e isosisma di appartenenza dei paesi presentati di seguito	pag 135
8.7. Confronto tra le il terremoto del 6 aprile 2009 a L'Aquila e del 27 febbraio 2010 in Cile	pag 153

Bibliografia

- Akkar S. e Bommer J. J., 2007, **Empirical Prediction Equations for Peak Ground Velocity Derived from Strong-Motion Records from Europe and Middle East**, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 97, No. 2, pp. 511-530, April 2007
- Akkar S. e Bommer J. J., 2007, **Prediction of elastic displacement response spectra in Europe and Middle East**, Earthquake Engng Struct. Dyn. 2007; 36:1275-1301, www.interscience.wiley.com
- Ameri G., Augliera P., Azzara R. M., Bergamaschi F., Bordoni P., Cara F., Cogliano R., Cultrera G., D'Alema E., Di Giacomo D., Di Giulio G., Fodarella A., Franceschina G., Gallipoli M. R., Harabaglia P., Ladina C., Lovati S., Luzi L., Marzorati S., Massa M., Milana G., Mucciarelli M., Pacor F., Parolai S., Picozzi M., Pilz M., Puglia R., Pucillo S., Riccio G. (2009). **Valutazione della risposta sismica locale di alcuni siti della media valle dell'Aterno**. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, IMAA-CNR, DiSGG-Università della Basilicata, Helmholtz Centre Potsdam GFZ German Research Centre for Geosciences
- Ameri G., Augliera P., Bindi D., D'Alema E., Ladina C., Lovati S., Luzi L., Marzorati S., Massa M., Pacor F., Puglia R. (2009). **Strong-motion parameters of the $M_w=6,3$ Abruzzo (Central Italy) earthquake**. INGV sezione Milano-Pavia, Italy, http://esse4.mi.ingv.it/images/stories/report_ran_20090406_v2.pdf
- Ameri G., Massa M., Bindi D., D'Alema E., Gorini A., Luzi L., Marzorati S., Pacor F., Paolucci R., Puglia R., Smerzini S. (2009). **The 6 April 2009 $M_w6,3$ L'Aquila (Central Italy) Earthquake: Strong-motion Observations**. Seismological research letters, volume 80, number 6
- Araya R, Saragoni G R. (agosto 1980) **Earthquake ground motion capacity to produce structural damage**. Publicación SES I 7/80 (156), Structural Engineering Division, Civil Engineering Department, University of Chile
- Araya R, Saragoni G R. (1984) **Earthquake accelerogram destructiveness potencial factor**. 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, U.S.A
- Arias A. (1969). **A measure of earthquake intensity**. Massachusetts Institute of technology, Cambridge, Massachusetts
- Arroyo A. Lopez, V. Schenk, D. Mayer-Rosa e P.W. Burton (March, 1984), **Engineering Geology**, Elsevier
- ASI (Agenzia Spaziale Italiana). **La faglia del terremoto individuata grazie ai dati di COSMO-SkyMed**, 23 aprile 2009
- Astroza I.M., Cabezas M. F., Moroni Y. M. O., Massone S. L., Ruiz T. S., Parra E., Cordero O.F., Mottadelli A., aprile 2010, **Intensidades sismicas en el area de danos del terremoto del 27 de febrero de 2010**, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile
- Atzori S., Hunstad I., Chini M., Salvi S., Tolomei C., Bignami C., Stramondo S., Trasatti E., Antonioli A. e Boschi E. (2009). **Finite fault inversion of DInSAR coseismic displacement of the 2009 L'Aquila earthquake (Central Italy)**. Geoph. Res. Lett., doi: 10.1029/2009GL039293

- Barrientos S. (1988). *Slip distribution of the 1985 Central Chile earthquake*. Tectonophysics 145, 225–241
- Barrientos S., 3 aprile 2010, *Informe Tecnico: Terremoto Cauquenes 27 febbraio 2010*, Servicio Sismologico, Universidad de Chile
- Bertini T., Bosi C., and Galadini F. (1989). *La conca di Fossa-S. Demetrio dei Vestini*. In: CNR, Centro di Studio per la Geologia Tecnica, ENEA, P.A.S.: "Elementi di tettonica pliocenicoquaternaria ed indizi di sismicità olocenica nell'Appennino laziale-abruzzese". Società Geologica Italiana, L'Aquila, 26-58
- Bertini T. e Bosi C. (1993). *La tettonica quaternaria della conca di Fossa (L'Aquila)*. Il Quaternario 6, 293–314
- Boncio P., Lavecchia G. e Pace B. (2004). *Defining a model of 3D seismogenic sources for Seismic Hazard Assessment applications: the case of central Apennines (Italy)*. Journal of Seismology, 8/3, 407-425
- Bosi C. e Bertini T. (1970). *Geologia della Media Valle dell'Aterno*. Memorie della Società Geologica Italiana, Volume IX, 719-777
- Cavinato G.P. and De Celles P.G. (1999). *Extensional basins in the tectonically bimodal central Apennines fold-thrust belt, Italy: response to corner flow above a subducting slab in retrograde motion*. Geology, 27, 955-958
- Celebi M., Bazzurro P., Chiaraluce L., Clemente P., Decanini L., DeSortis A., Ellsworth W., Gorini A., Kalkan E., Maruccci S., Milana G., Mollaioli F., Olivieri M., Paolucci R., Rinaldis D., Rovelli A., Sabetta F., Stephens C. (scritto pubblicato negli Stati Uniti in agosto 2010). *Recorded Motions of the Mw 6.3 April 6, 2009 L'Aquila (Italy) Earthquake and Implications for Building Structural Damage: Overview*.
- Cheloni D., D'Agostino N., D'Anastasio E, Mantenuto S, Giuliani R., Calcaterra S., Gambino P., Mattone M. (2009). *Coseismic and initial postseismic slip of the 2009 Mw 6.3 L'Aquila earthquake*. Geophysical International Journal, Fast Abstracts, in stampa
- Chiarabba C. & CNT Working Group (INGV) (2009). *Terremoto de L'Aquila: il contributo della sismologia*. Workshop on "The April 2009 L'Aquila earthquake (Italy): first results and future strategies". Chieti, June 4, 2009 (Italy): <http://www.unich.it/geosis/PROGRAMMA.html>)
- Cocco M. (2009). INGV Internal Report: *The April 6th 2009 (Ml 5.8) earthquake preliminary results*. EGU General Assembly, Vienna, Austria, 19-24 April (massimo.cocco@ingv.it; claudio.chiarabba@ingv.it; pasquale.degori@ingv.it).
- Concha Acuna P. A. (2003), *Estudio de los acelerogramas de la zona de subduccion de Cascadia, Estados Unidos y Canada*, Universidad de Chile, facultad de ciencias fisicas y matematicas, departamento de ingegneria civil
- D'Agostino N. (2009). *Il terremoto dell'Aquila del 6 aprile 2009: risultati scientifici preliminari*. INGV Internal Report (dagostin@ingv.it)

Decanini L., Liberatore L., Mollaioli F., Monti G., Al Shawa O. (2009). **Terremoto aquilano del 6 aprile 2009. Studio preliminare della domanda sismica elastica ed anelastica in termini di energia, spostamenti e forze.** Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma “La Sapienza”

Devoti R., Riguzzi F., Cuffaro M., and Doglioni C. (2008). **New GPS constraints on the kinematics of the Appenines subduction.** Earth Planet Sci. Lett., doi: 10.1016/j.epsl.2008.06.031

Di Capua G., INGV Rome, Italy; Kayen R. E., USGS Menlo Park, USA; Kieffer D. S., Graz University of Technology, Austria; Button E., ETH Zurich, Switzerland; Biscontin G., Texas A&M University, USA; Scasserra G. and Lanzo G., University of Rome, Italy; Tommasi P. and Pagliaroli A., CNR-IGAG, Rome, Italy; Silvestri F. and d'Onofrio A., University of Naples, Italy; Violante C., Institute for Coastal and Marine Environment, Naples, Italy; Simonelli A. L., University of Sannio, Benevento, Italy; Puglia R., INGV, Milan, Italy; Mylonakis G., Athanasopoulos G., and Vlahakis V., University of Patras, Greece; Jonathan P. Stewart, University of California, Los Angeles, USA

Version 2. September 4, 2009

Preliminary Report on the Seismological and Geotechnical Aspects of the April 6 2009 L'Aquila Earthquake in Central Italy

Report for Web Dissemination

Geotechnical Earthquake Engineering Reconnaissance

http://www.geerassociation.org/Post_EQ_Reports.html

GEER Association Report No. GEER-016

Di Capua G., Lanzo G., Luzi L., Pacor F., Paolucci R., Peppoloni S., Scasserra G., Puglia R. (2009), **Caratteristiche geologiche e classificazione di sito delle stazioni accelerometriche della RAN ubicate a L'Aquila**, INGV-Roma, Sapienza Università di Roma, INGV – Milano - Pavia, Politecnico di Milano; <http://esse4.mi.ingv.it>

EERI, **The M_w 6,3 Abruzzo, Italy, Earthquake of April 6, 2009.** Special Earthquake Report_June 2009

Faccioli E., Paolucci R. (2005), **Elementi di sismologia applicata all'ingegneria**, Pitagora editrice Bologna

Faluccci E., Gori S., Peronace E., Fubelli G., Moro M., Saroli M., Giaccio B., Messina P., Naso G., Scardia G., Sposato A., Voltaggio M., Galli P., Galadini F. (2009). **The Paganica Fault and Surface Coseismic Ruptures Caused by the 6 April 2009 Earthquake (L'Aquila, Central Italy).** Seismological research letters, volume 80, number 6

Frau C. D., 2009, **Demanda sismica incluyendo efescos de directividad en zonas near-fault de Argentina**, CeReDeTeC, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnologica Nacional

Galadini F. e Galli P. (2000). **Active tectonics in the central Apennines (Italy) - input data for seismic hazard assessment.** Nat. Haz. 22, 225–270.

Galadini F., Pantosti D., Boncio P., Galli P., Messina P., Montone P., Pizzi A., Salvi S. (2009). **Il terremoto del 6 aprile e le conoscenze sulle faglie attive dell'Appenninocentrale.** Progettazione antisismica, numero 03, “L'Aquila, 6 aprile 2009, ore 3.32”, IUSS Press

Galli P., Galadini F. e Pantosti D. (2008). **Twenty years of paleoseismology in Italy**. Earth Science Review, 88, 89-117

Galli P. e Camassi R. (2009), **Rapporto sugli effetti del terremoto aquilano del 6 aprile 2009**. Dipartimento della Protezione Civile Nazionale, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Galli P., Camassi R., Azzaro R., Bernardini F., Castenetto S., Ercolani E., Molin D., Peronace E., Rossi A., Vecchi M., Tertulliani A. (2009). **Il terremoto aquilano del 6 aprile 2009: rilievo macrosismico, effetti di superficie ed implicazioni sismotettoniche**. DPC, Dipartimento Protezione Civile Nazionale, Roma; INGV Istituto Nazionale di geofisica e Vulcanologia, Bologna; INGV Istituto Nazionale di geofisica e Vulcanologia, Catania; INGV Istituto Nazionale di geofisica e Vulcanologia, Roma

Giovinazzi S., Lagomarsino S. (2001). **Una metodologia per l'analisi di vulnerabilità sismica del costruito**. Atti del X Convegno Nazionale: L'ingegneria sismica in Italia, Potenza

Grunthal G. (1998). **European Macroseismic Scale 1998**. (Grunthal Ed.), Conseil de l'Europe, Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie, Volume 15, Luxembourg, 1998

Hall J. F., Heaton T. H., Halling M. W., Wald D. J. (1995). **Near-source ground motion and its effects on flexible buildings**. Earthquake Spectra 11(4), 569–605

Kawashima K., Aydan O., Aoki T., Kishimoto I., Konagai K., Matsui T., Sakuta J., Takahashi N., Teodori S.-P., Yamashita A. (futura pubblicazione su Journal of Earthquake Engineering, 2010). **Reconnaissance Investigation on the damage of the 2009 L'Aquila, Central Italy Earthquake**. Journal of Earthquake Engineering

Karnik V., Schenkova Z., Schenk V. (1 ottobre 1984). **Vulnerability and the MSK scale**. Engineering Geology, 20 (1984) 161-168, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam-Printed in The Netherlands

Lavecchia G., Boncio P., Brozzetti F., De Nardis R., Di Naccio D., Ferrarini F., Pizzi A. e Pomposo G. (2009). **The April 2009 Aquila (central Italy) seismic sequence (Mw6.3): A preliminary seismotectonic picture**. P. Guarnieri (ed.), Recent Progress on Earthquake Geology, Nova Publisher, in stampa

Levret A. e Mohammadioun B. (1983). **Determination of seismic reference motion for nuclear sites in France**. Engineering Geology, 20 (1984) 25-38

Makris N. (1997) **Rigidity-plasticity-viscosity: can electro rheological dampers protect base isolated structures from nearsource ground motions**. Earthquake Eng Struct Dyn 26, 571–591

Mantenuto S., Bonci L., Calcaterra S., D'Agostino N., Giuliani R., Mattone M. e Merli K. (2007). **Analysis of active extension in the Central Apennines (Abruzzo, Italy) using GPS measurements**. Geophysical Research Abstracts 9, 04341. EGU2007-A-04341

Mantovani E. (1991). **La valutazione della pericolosità sismica in Italia**. Le Scienze quaderni, 59, 51-59

Medvedev S., Sponheuer W. e Karnik V. (1963). **Intensity scale of earthquakes**. UGGI 13th Conf., Berkeley

Messina P., Galli P., Falcucci E., Galadini F., Giaccio B., Gori S., Peronace E., Sposato A. (2009). ***Evoluzione geologica e tettonica quaternaria dell'area interessata dal terremoto aquilano del 2009***. CNR-Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria, Monterotondo Scalo; Dipartimento della Protezione Civile, Roma; INGV, Milano

Mollaioli F. (1996), ***Formulazione energetica del potere distruttivo dei terremoti. Analisi alla sorgente, propagazione, effetti locali e risposta strutturale***, Università di Roma "La Sapienza"-Università de L'Aquila

Monge E. J., Astroza I.M., ***Metodologia para determinar el grado de intensidad a partir de los daños***, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile

Musson R.M.W., British Geological Survey, Edinburgh, Great Britain J. Schwarz, Bauhaus University Weimar, Germany, Stucchi M., Istituto di Ricerca sul Rischio Sismico, C.N.R, Milan, Italy (Luxembourg 1998), Chairman of the ESC Working Group "Macroseismic Scales" GeoForschungsZentrum Potsdam, Germany. ***European Macroseismic Scale 1998 EMS-98***. Editor G. Grünthal

Pacor F., Ameri G., Bindi D., Luzi L., Massa M., Paolucci R. (2009). ***Il terremoto de L'Aquila ($M_w=6,3$) del 6 aprile 2009: caratteristiche dei dati stron motion***. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Milano; Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano

Pantosti D. (2009). ***Il Terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009: cosa sapevamo e cosa abbiamo imparato***. Sezione Sismologia e Tettonofisica –INGV, Roma

Parotto M. (1980). ***Appennin Central***. In: "Géologie d'Europe"; guide prepared for 26th International Congress of Geology, Paris

Piatanesi A. e Cirella A. (2009). ***Rupture process of the 2009 $M_w=6.3$ L'Aquila (Central Italy) earthquake from non linear inversion of strong motion and GPS data***. INGV Report

Rojas Rojas M. V. (1999). ***Analisis de la potencia sismica de acelerogramas destructivos***. Universidad de Chile, facultad de ciencias fisicas y matematicas, departamento de ingenieria civil

Rovida A., Castelli V., Camassi R., and Stucchi M. (2009). ***Terremoti storici nell'area colpita dagli eventi sismici dell'aprile 2009***. INGV Report (<http://www.mi.ingv.it/eq/090406/storia.html>)

Ruiz S., Kausel E., Campos J., Saragoni G. R., Madariaga R. (2010). ***Identification of High Frequency Pulses from Earthquake Asperities Along Chilean Subduction Zone Using Strong Motion***. Pure and Applied Geophysics

Ruiz Tapia S. A. (2007). ***Acelerogramas artificiales noestacionarios acoplados 3D en alta frecuencia considerando la cinematica de ruptura de asperezas y efectos del suelo***. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Fisicas y Matematicas, Departamento de Ingeniería Civil

Rossetto T., Peiris N., Alarcon J., So E., Sargeant S., Sword-Daniels V., Libberton C., Verrucci E., Del Re D., Free M. (2009). ***The L'Aquila, Italy earthquake of 6 April 2009***. EEFIT

Rovida A., Castelli V., Camassi R., and Stucchi M. (2009). **Terremoti storici nell'area colpita dagli eventi sismici dell'aprile 2009**. INGV Report (<http://www.mi.ingv.it/eq/090406/storia.html>)

Sabetta F. (2009). **Terremoto dell'Abruzzo: sequenza sismica, attenuazione, scenari e danneggiamento**. Ufficio Valutazione del Rischio – Dipartimento della Protezione Civile, Roma

Salvi S. and Working Group (2009). **Risultati Preliminari SAR**. INGV Report (<http://portale.ingv.it/primo-piano/archivio-primo-piano/notizie-2009/terremoto-6-aprile/sar>)

Saragoni G. R., Holmberg A., Sáez A. (1989) **Destructiveness potential factor and destructiveness of 1985 Chile earthquake**. 5th Chilean Congress of Seismology and Earthquake Engineering. Santiago. Chile. 1989; 1: 369-378

Tertulliani A., Arcoraci L., Berardi M., Bernardini F., Camassi R., Castellano C. Del Mese S., Ercolani E., Graziani L., Leschiutta I., Rossi A., Vecchi M. (maggio 2010) **An application of EMS98 in a medium-sized city: The case of L'Aquila (Central Italy) after the April 6, 2009 Mw 6.3 earthquake**. Bull Earthquake Eng; DOI 10.1007/s10518-010-9188-4

Tozzi M. (1993). **Deep structure of the central Appennine**. In: "Guide Geologiche Regionali - Lazio", 5, 45-49. Società Geologica d'Italia

Valensise G. (2009). **Alcune considerazioni sulla sismotettonica del terremoto del 6 aprile**. INGV Internal Report (valensise@ingv.it)

Wood S., Wight J., Moehle J. (1987). **The 1985 Chile earthquake observations on earthquake-resistant construction in Vina del Mar**. Engineering studies 532, National science foundation, University of Illinois

Siti internet

Boxer program (Gasperini P., 2004): <http://ibogfs.df.unibo.it/user2/paolo/www/boxer/boxer.html>

CESMD: Center for Engineering Strong Motion Data: www.strongmotioncenter.org

EEFIT: Earthquake Engineering Field Investigation Team:
www.istructe.org/knowledge_expertise/EEFIT/Pages/default.aspx

EERI: Earthquake Engineering Research Institute: www.eeri.org/site/

EMERGEO Team (2009). INGV Report (<http://portale.ingv.it/real-timemonitoring/emergeo/>)

Geo-engineering Extreme Events Reconnaissance: <http://research.eerc.berkeley.edu/projects/GEER/>

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; Itaca: Italian Acelerometric Archive:
<http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet/>

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, sezione di Bologna: www.bo.ingv.it

Mappe interattive di pericolosità sismica: <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>

OneGeology: www.onegeology.org

Registrazioni digitalizzate Cile: www.sismologia.cl

ReLUIs: REte dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica: www.reluis.it

Red Nacional De Acelerografos RENADIC, departamento de ingenieria civil, universidad de Chile:
www.renadic.cl

Risentimento: <http://www.haisentitoilterremoto.it>

The institution of structural engineers: www.istructe.org

USGS: U. S. Geological Survey: www.usgs.gov

Wikipedia: www.wikipedia.org

Wikimapia: www.wikimapia.org

Persone contattate

Per lo svolgimento del presente lavoro di tesi è stato fondamentale l'aiuto di diverse persone per la raccolta di informazioni e materiale; il contatto diretto con esperti sul tema è stato facilitato dalle numerose visite a Santiago provenienti da tutto il mondo in seguito al terremoto del 27 febbraio 2010. In particolare si sono avuti scambi di informazioni con Mehmet Celebi, Antonio Tralli, Maurizio Indirli, Sergio Ruiz e Maximiliano Astroza oltre a Rodolfo Saragoni ed Ezio Faccioli.

Rodolfo Saragoni Huerta

Profesor Titular
Departamento de Ingenieria Civil
Universidad de Chile
e-mail: sarago@ing.uchile.cl

Ezio Faccioli

Professor of Earthquake Engineering
Technical University (Politecnico)
Piazza L. da Vinci 32, 20133 Milan, Italy
e-mail: faccioli@stru.polimi.it

Maximiliano Astroza I.

Profesor de Jornada Completa
Departamento de Ingeniería Civil
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Universidad de Chile
Avda. Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile
e-mail: mastroza@ing.uchile.cl

Sergio Ruiz

Estudiante Doctorado
Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, Chile
Laboratoire de Geologie, Ecole Normal Supérieure, Paris, Francia
e-mail: sruizt@gmail.com

Dr. Mehmet Celebi, P.E.

Senior Research Civil Engineer and
Manager, Structural Monitoring
USGS (MS977)
345 Middlefield Rd.
Menlo Park, Ca. 94025
e-mail: celebi@usgs.gov

Antonio Tralli

Professor of Structural Mechanics (Scienza delle Costruzioni)
University of Ferrara
Via G. Saragat 1, 44100 Ferrara, Italy
e-mail: tra@unife.it

Ing. Maurizio Indirli

ENEA-UTSISM

ENEA, Ente Nazionale per le Nuove tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo economico sostenibile

UTSISM, Unità Tecnica di Ingegneria Sismica

PSICHE, Aggregato Progettuale P99Q Protezione Sismica Innovativa del Cultural Heritage

via Martiri di Monte Sole 4

40129 Bologna, Italy

e-mail: maurizio.indirli@enea.it

Dr. Fabrizio Mollaioli

Associate Professor

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica

Prima Facoltà di Architettura "L. Quaroni"

Università di Roma "La Sapienza"

Via Gramsci, 53

00197 - Roma

e-mail: fabrizio.mollaioli@uniroma1.it

Fabio Sabetta

Ufficio Valutazione del Rischio Sismico

Dipartimento della Protezione Civile

Via Vitorchiano 4 - 00189 Roma

e-mail : fabio.sabetta@protezionecivile.it

Prof. Luis D. Decanini

Prima facoltà di architettura "Ludovico Quaroni"

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica

Sapienza

Università di Roma, 00197 Roma

e-mail: luis.decanini@uniroma1.it