

1.5 Caratteristiche dei dati accelerometrici registrati durante la sequenza sismica aquilana

F. Pacor¹, R. Paolucci¹, I. Iervolino², M. Nicoletti³, G. Ameri⁴, D. Bindi¹, C. Cauzzi⁴, E. Chioccarelli¹, E. D'Alema¹, L. Luzi¹, S. Marzorati¹, M. Massa², R. Puglia¹ ■

1.5.1 Introduzione

I dati accelerometrici relativi alla sequenza sismica de L'Aquila, iniziata con l'evento del 6 Aprile (M_W 6.3), provengono dalla rete Rete Accelerometrica Nazionale (RAN), gestita dal Dipartimento della Protezione Civile (DPC) e da una rete temporanea installata il giorno dopo la scossa principale ad opera dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV MI-PV). I dati del DPC sono scaricabili dalla banca dati accelerometrica italiana ITACA (<http://itaca.mi.ingv.it>), mentre quelli dell'INGV sono accessibili dal sito Internet <http://accel.mi.ingv.it/statiche/ABRUZZO-2009/main.html>.

Il terremoto de L'Aquila è il terzo evento più forte che abbia prodotto registrazioni accelerometriche in Italia, dopo i terremoti dell'Irpinia (1980, M_W 6.9) e del Friuli (1976, M_W 6.4). Questo evento, insieme alle 12 repliche più forti ($M_W > 4.0$) ha fornito un insieme di dati accelerometrici unico in Italia, in particolare per la presenza di un numero consistente di registrazioni in zona epicentrale ("campo vicino").

Il *data set* è composto da circa 300 accelerogrammi digitali (di cui 270 provenienti dalla RAN), con un ottimo rapporto segnale/rumore, registrati da circa 70 stazioni, installate in varie condizioni di sito, a distanze comprese fra 0 e 300 km. L'importanza di questo *data set*, non solo a livello nazionale, è legato al contributo significativo che fornisce nel col-

mare una lacuna nella distribuzione magnitudodistanza dei dati *strong motion* italiani e mondiali, soprattutto per quanto riguarda gli eventi con meccanismo di faglia normale (Ameri et al.; 2009).

I dati registrati in campo vicino provengono da un transetto composto da 6 stazioni installato dalla Protezione Civile nel 2001 nella Alta Valle dell'Aterno, con lo scopo di investigare la variabilità del moto sismico rispetto alle condizioni geologiche locali, dalla stazione AQK, installata in prossimità del centro urbano e da una stazione (AQU) appartenente alla rete broad band Mednet (<http://mednet.rm.ingv.it/data.php>), situata nel castello de L'Aquila. Queste stazioni distano meno di 5 km dall'epicentro dell'evento principale, ricadendo all'interno della proiezione superficiale del piano di rottura. A queste si aggiungono le registrazioni delle repliche, ottenute dalle stazioni della rete temporanea INGV, installata in area epicentrale.

In questo lavoro si presenta un resoconto delle principali caratteristiche dello scuotimento del suolo verificatosi durante la sequenza sismica aquilana, attraverso l'analisi dei dati accelerometrici relativi alla scossa principale e alle due repliche più forti. Si discutono in particolare la dipendenza di diversi parametri *strong motion* dalla distanza, dall'azimuth e dalle condizioni di sito, e l'effetto delle caratteristiche del moto in campo vicino sulla risposta strutturale.

1.5.2 Caratteristiche del *data set* accelerometrico

La distribuzione spaziale delle stazioni accelerometriche che hanno registrato la sequenza abruzzese è illustrata in figura 1 mentre in Tabella 1 si riportano le loro principali caratteristiche. La lista dei 13 eventi con $M \geq 4$ analizzati in questo lavoro è riportata in Tabella 2.

Le stazioni sono classificate seguendo l'Eurocodice 8 (EC8; CEN, 2004) e le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC08, 2008), che definiscono le classi di sito sulla base del valor medio della velo-

cità delle onde S nei primi 30 metri del profilo stratigrafico - V_{s30} (A: >800 m/s, B: 360-800 m/s, C: 180-360 m/s, D: <180 m/s). In questo lavoro la classe di ciascuna stazione è stata attribuita sulla base delle informazioni geologiche-geofisiche disponibili (S4 project - <http://esse4.mi.ingv.it> - Deliverable D4, 2009), e solo alcune stazioni, fra le quali si cita AQV in area epicentrale, sono state classificate utilizzando una misura diretta della velocità delle onde di taglio. La maggior parte delle stazioni ricade in classe A e B e solo alcune in classe C, fra cui le stazioni

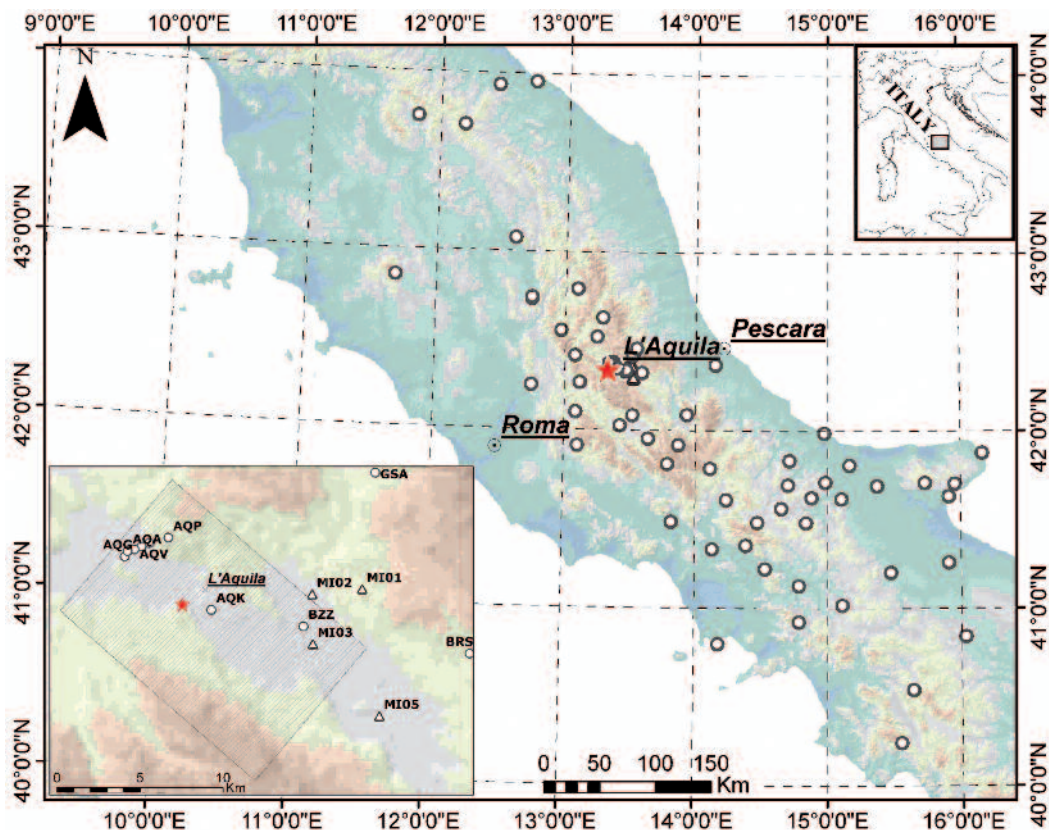
¹ INGV - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Milano. www.ingv.it

² Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano. www.stru.polimi.it

³ Dipartimento della Protezione Civile, Roma. www.protezionecivile.it

⁴ Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi di Napoli Federico II. www.dist.unina.it

Fig. 1
Ubicazione delle stazioni accelerometriche RAN (cerchi) e INGV MI-PV (triangoli) analizzate in questo lavoro. La stella indica la posizione dell'epicentro del terremoto del 6 Aprile. Nell'inserto, il rettangolo rappresenta la proiezione della superficie di faglia dell'evento principale.



temporanee installate dall'INGV in area epicentrale. Le stazioni del Gran Sasso GSA e GSG sono installate nel Laboratorio di Fisica Nucleare, la prima in superficie, la seconda a più di 200m di profondità e mancante del segnale GPS.

Gli strumenti installati nelle stazioni RAN sono quasi tutti accelerometri Kinematics a tre componenti, accoppiati a digitalizzatori con 24-bit con passo di campionamento di 200 S/s, mentre le 4 stazioni dell'INGV sono equipaggiate con un accelerometro (Kinematics Episensor ES-T) e un sismometro (Lennartz 3D-5s o 3DLite) collegati a un digitalizzatore Reftek130 a 6 canali, con passo di campionamento di 100 S/s.

I dati accelerometrici sono disponibili sia nella versione non-corretta che corretta, quest'ultima ottenuta applicando il processamento utilizzato in ITACA e descritto da Massa et al. (2009). Seguendo questa procedura, i dati sono corretti per la linea di base, calcolata sull'intera traccia, finestrati nel dominio del tempo applicando una finestra coseno in modo da ottenere valori nulli all'inizio e alla fine della traccia, e filtrati con un filtro Butterworth passa-banda del 4° ordine operante nel dominio del tempo. Le frequenze di taglio sono state selezionate visualizzando lo spettro di Fourier del segnale non corretto e individuando i valori dove gli spettri si discostano dagli andamenti attesi. Generalmente i dati sono stati corretti nell'intervallo di frequenze comprese

fra 0.1 e 25 – 50 Hz, dove i valori più bassi della frequenza passa basso sono stati scelti per le stazioni lontane dall'epicentro ($R_{epi} > 100$ km).

La figura 2 mostra la distribuzione delle medie geometriche dei Picchi di Accelerazione, PGA, e di Velocità, PGV distinti per intervalli di distanze epicentrali, ottenuti dalle tracce di accelerazione corrette, in funzione della magnitudo degli eventi. I valori di accelerazione e velocità più forti sono stati registrati dalle stazioni localizzate in area epicentrale durante l'evento principale, con valori massimi di PGA e PGV (componente orizzontale) pari, rispettivamente, a 0.66 g e 43 cm/s alla stazione AQV (classe B), e durante la replica del 7 Aprile (ore 17:47), con un valore massimo orizzontale pari a $PGA = 0.67$ g e $PGV = 24$ cm/s alla stazione MI05 (classe C). Tuttavia valori superiori a 0.2 g sono stati osservati anche durante la scossa del 7 Aprile (ore 21:34, M_w 4.6) alle stazioni AQM e AQV, poste a meno di 3 km dall'epicentro.

Come noto, il picco di accelerazione mostra una minore correlazione con la magnitudo rispetto alla PGV. La presenza di valori elevati di PGA anche per magnitudo basse si può spiegare con il fatto che, a causa della forte dipendenza da dettagli di piccola scala nelle propagazione ondosa, il picco di accelerazione mostra generalmente una dipendenza più debole dalla magnitudo. (v. per es. Hanks e McGuire, 1981; Faccioli e Paolucci, 2005).

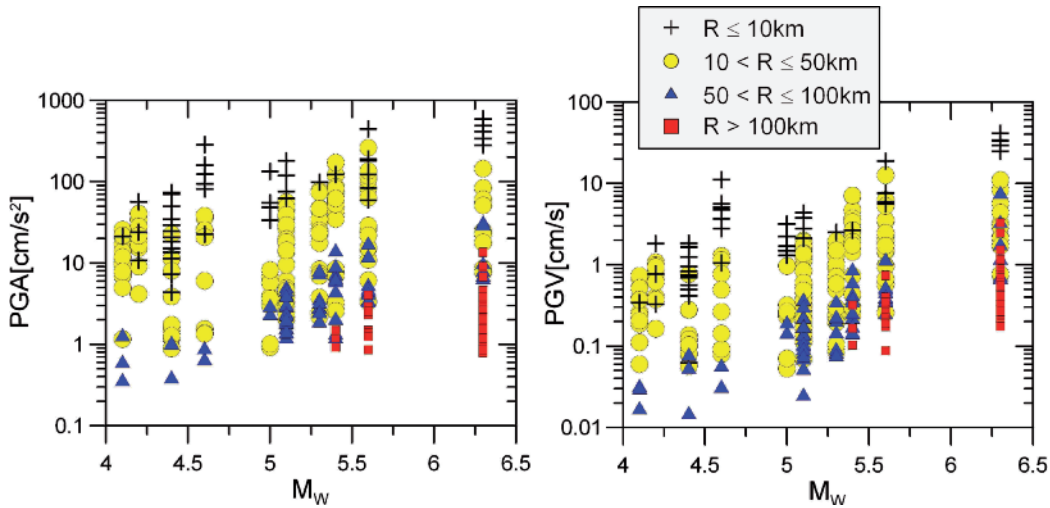


Fig. 2
Media geometrica tra le componenti orizzontali dei valori di picco di accelerazione, PGA (a sinistra) e di velocità, PGV (a destra) osservati durante i 13 eventi più forti ($M > 4$) della sequenza sismica dell'Aquila, graficati in funzione della magnitudo-momento. I vari simboli rappresentano diversi intervalli di distanze epicentrali.

1.5.3 Distribuzione spaziale del moto sismico

Una rappresentazione sintetica della variabilità spaziale del moto sismico può essere ottenuta interpolando i valori massimi delle PGA osservate, come mostrato in figura 3 per l'evento del 6 Aprile, dove i valori di questo studio sono stati integrati con quelli derivati dalle stazioni delle

rete nazionale INGV-CNT per il monitoraggio del territorio. La zona di massimo scuotimento ricade all'interno della proiezione in superficie della faglia, nell'area del tetto (*hanging wall*), e appare allungata in direzione Nord-Sud. I valori si attenuano con la distanza in modo asimmetrico, mostrando un decadimento più

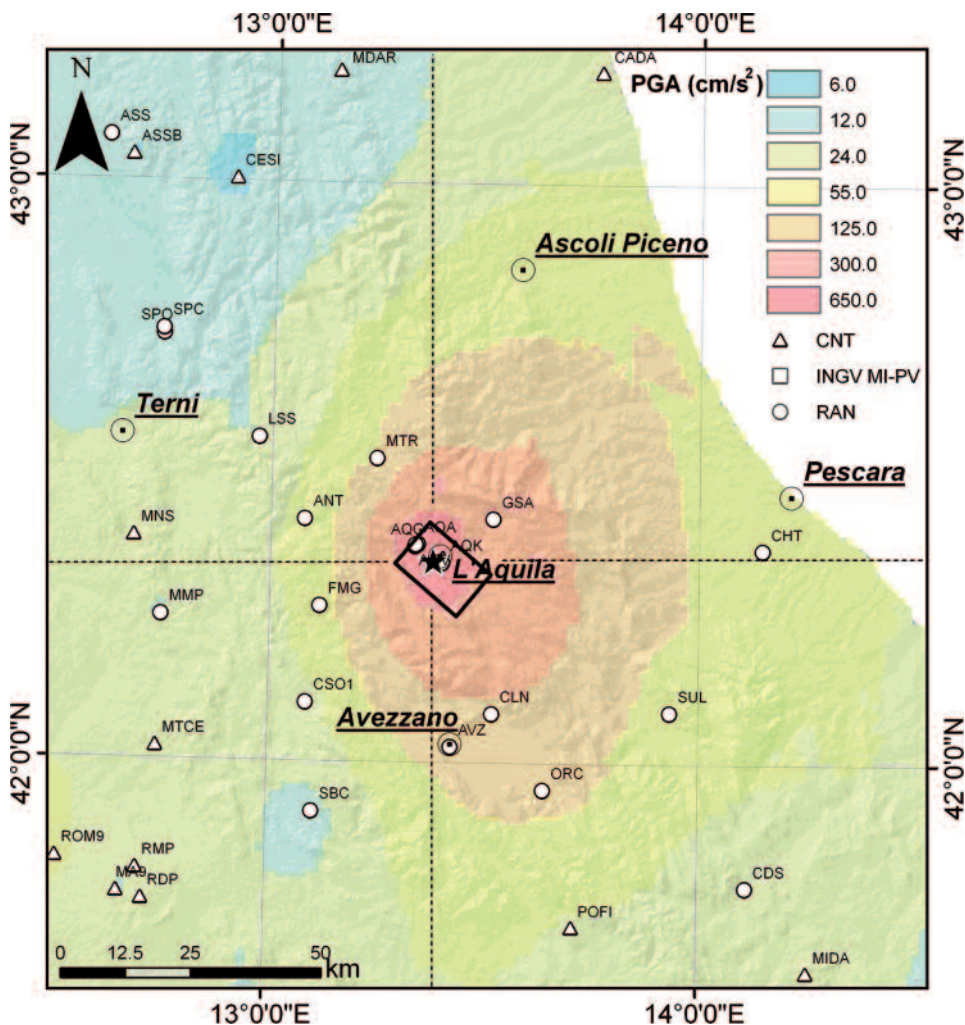
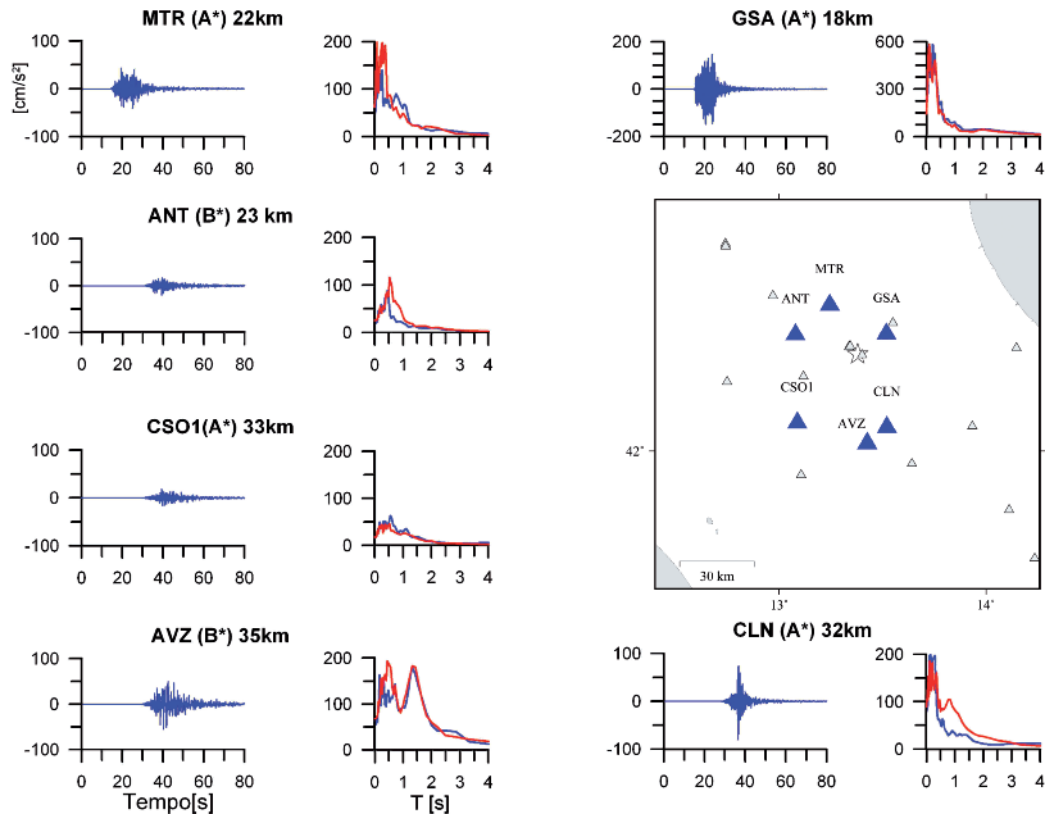


Fig. 3
Mappa dei picchi di accelerazione (massimo fra le componenti orizzontali) relativa all'evento principale (modificata da Ameri et al.; 2009). La posizione delle stazioni appartenenti alle varie reti è indicata da diversi simboli. La stella indica la posizione dell'epicentro e il rettangolo nero la proiezione della faglia in superficie.

Fig. 4
Tracce di accelerazione (componenti EW) e spettri di risposta in accelerazione (componente EW, blu; componente NS, rosso), relativi all'evento principale, registrate a 6 stazioni (triangoli blu) localizzate a distanze comprese tra i 18 e 32 km dall'epicentro (stella bianca) e a diversi azimuth. Per ogni stazione sono riportate la sigla, la categoria di suolo e la distanza epicentrale. I triangoli grigi rappresentano altre stazioni accelerometriche presenti in area epicentrale.



rapido verso Ovest; inoltre i valori di scuotimento compresi fra 125-300 cm/s^2 , si protrondono in direzione Sud-Est, suggerendo la presenza di effetti direttivi associati alla propagazione della rottura lungo la faglia nella stessa direzione (come anche osservato da Atzori et al., 2009 e Anzidei et al., 2009).

L'elevata variabilità del moto in area epicentrale può essere apprezzata in figura 4 dove, a titolo esemplificativo, sono riportate le tracce di accelerazione registrate (componente EW) a 6 stazioni distribuite tra i 20 e i 30 km attorno all'epicentro. Si osserva come le stazioni ANT e CSO1, localizzate ad Ovest dell'epicentro abbiano valori del moto più bassi rispetto alle stazioni GSA e CLN,

situate ad Est; inoltre valori più elevati del moto sono osservabili a Sud, ad esempio confrontando le registrazioni di AVZ con quelle di MTR, posta a Nord dell'epicentro. Si nota infine che anche gli effetti locali hanno un ruolo importante nel definire alcune caratteristiche del moto del suolo, quali l'ampio picco nello spettro di risposta ad AVZ a 1.5s e gli elevati valori delle ordinate spettrali tra 0 - 0.5s osservate a GSA.

Uno studio più approfondito della dipendenza del moto sismico dall'azimuth, basato sugli scarti tra i valori osservati e quelli predetti da un'equazione empirica del moto del suolo, ITA08, valida a livello nazionale (Bindi et al. 2009), è riportato in Ameri et al. (2009).

1.5.4 Confronto con le equazioni predittive del moto del suolo

In figura 5 (pannelli in alto) è illustrato l'andamento delle di PGA (m_H =massimo tra le componenti orizzontali) per l'evento principale, in funzione della distanza R_B , definita come la minima distanza della stazione rispetto alla proiezione in superficie del piano di faglia, e della categoria di suolo di fondazione.

I simboli a riempimento grigio si riferiscono a stazioni ad ovest dell'epicentro (azimuth compreso tra 180° e 360°) ed evidenziano livelli di scuotimento del suolo sistematicamente più bassi rispetto a quello subito dalle stazioni ad Est del-

l'epicentro (azimuth compreso tra 0° e 180°), per distanze comprese tra 10 e 100 km, a conferma di marcati effetti direzionali nella distribuzione del moto sismico, dovuti sia ad effetti di sorgente che di propagazione.

I dati sono confrontati con tre recenti relazioni di attenuazione: ITA08 (Bindi et al., 2009), basata sulle registrazioni contenute nella banca dati accelerometrica italiana (ITACA, <http://itaca.mi.ingv.it>); AKBO07 (Akkar and Bommer, 2007), sviluppata a partire dalla banca dati accelerometrica euro-mediterranea mantenuta presso l'Imperial College di Londra (<http://www.isesd.cv.ic.ac.uk/ESD/>); CF08 (Cauzzi and Faccioli, 2008), basata su un data-

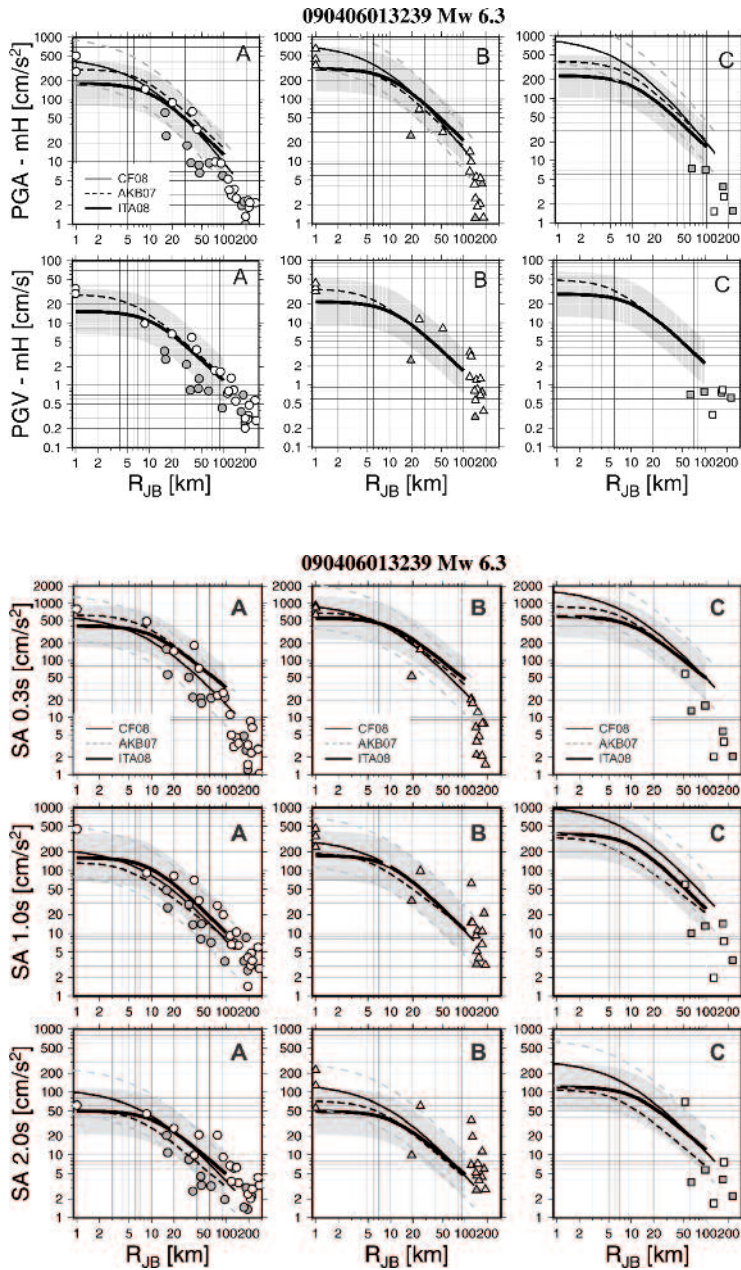


Fig. 5
 Confronto tra le PGA (in alto) e PGV (in basso) osservate durante il terremoto del 6 Aprile, e le leggi di predizione empiriche calibrate a scala nazionale (ITA08, linea nera in grassetto), a scala europea (AKB07, linea nera tratteggiata) ed a scala globale (CF08, linea nera sottile, solo per le PGA). I valori di picco sono rappresentati con diversi simboli per le differenti categorie di suolo. I colori si riferiscono all'azimuth della stazione, calcolato rispetto al Nord (simboli bianchi 0°-180°, simboli grigi 180°-360°). L'area in grigio indica $\pm 1\sigma$ (deviazione standard) relativa a ITA08, le linee tratteggiate in grigio indicano $\pm 1\sigma$ per CF08.

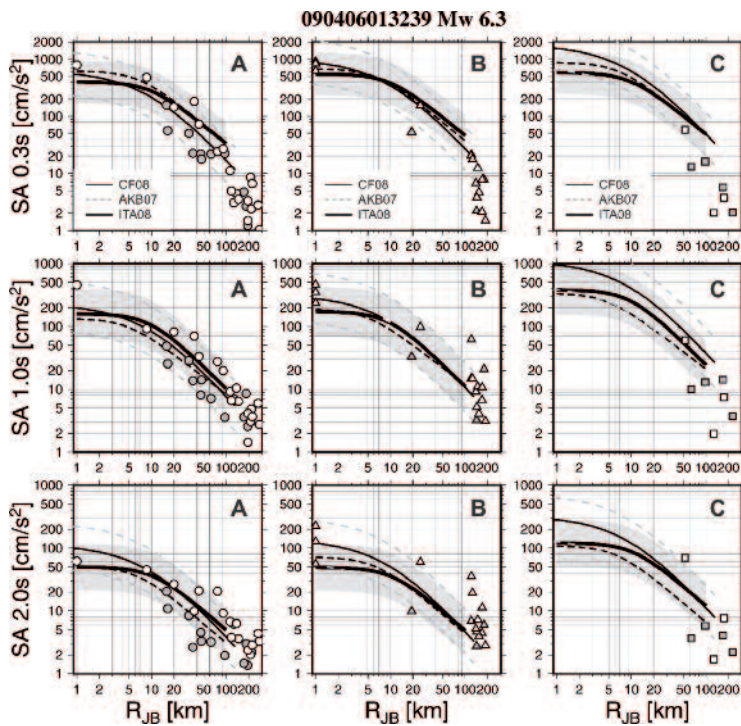


Fig. 6
 Confronto tra le ordinate spettrali di accelerazione (5% di smorzamento) calcolate per periodi pari 0.3 s, 1.0 s e 2.0 s e le tre relazioni empiriche definite in figura 5. La simbologia adottata è la stessa di figura 5.

base mondiale di registrazioni digitali, prevalentemente di provenienza giapponese.

Per necessità di sintesi nella rappresentazione, la metrica originale della CF08, definita dalla distanza ipocentrale è stata convertita in R_{JB} attraverso una relazione empirica tarata ad hoc per il caso in esame, mentre la media geometrica delle componenti orizzontali, g_M , è stata convertita in valore pari alla massima componente orizzontale (mH) secondo quanto riportato in Beyer e Bommer (2006).

La zona tratteggiata in ciascun grafico rappresenta l'area racchiusa tra il 16° e l'84° percentile della predizione ITA08, mentre le curve grigie tratteggiate si riferiscono al 16° ed 84° percentile della predizione CF08.

Si osserva, in generale, che le equazioni predit-

tive seguono abbastanza bene i dati osservati, nel campo di distanze di validità delle relazioni empiriche (< 150 km). In particolare, le equazioni AKB07 e CF08, per le caratteristiche delle banche dati di calibrazione (europea e mondiale), sono in grado di cogliere, anche in termini di predizioni mediane, i valori di PGA registrati in campo vicino su suolo di tipo rigido. Viceversa, nelle stesse condizioni, ITA08 fornisce valori di picco minori, tuttavia va notato che nell'intervallo di magnitudo e distanze considerate, la relazione non è ben vincolata per la mancanza di registrazioni corrispondenti nel *data set* ITACA di partenza.

Considerazioni analoghe valgono anche per le PGV, riportate nei tre pannelli in basso della figura 5, dove è mostrato un confronto tra i

Fig. 7

Confronto tra le PGA relative al terremoto del 7 Aprile 2009 (17:47:37), Mw 5.6, e relazioni empiriche calibrate a scala nazionale (ITA08, pannelli in alto) ed a scala globale (CF08, pannelli in basso). Le aree in grigio indicano valori compresi tra $\pm 1\alpha$ (deviazione standard). Le curve CF08 sotto i 10 km sono riportate con linea tratteggiata ad indicare che al di sotto di tale soglia le equazioni di predizione non sono vincolate a dati osservati per questi valori di distanza.

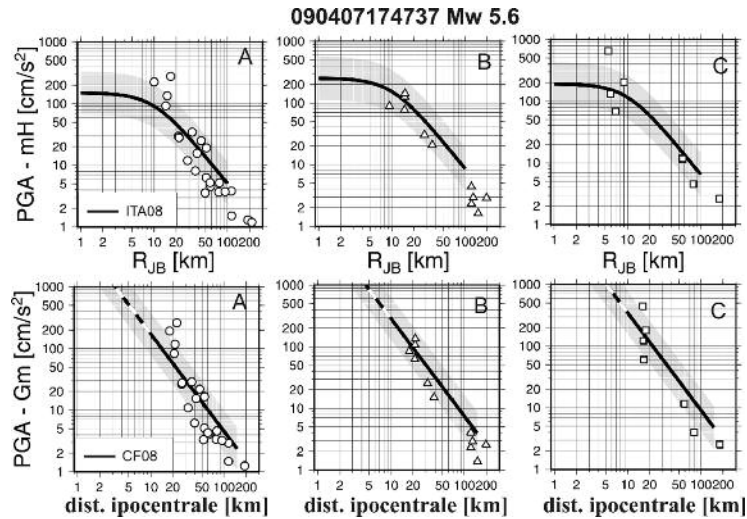
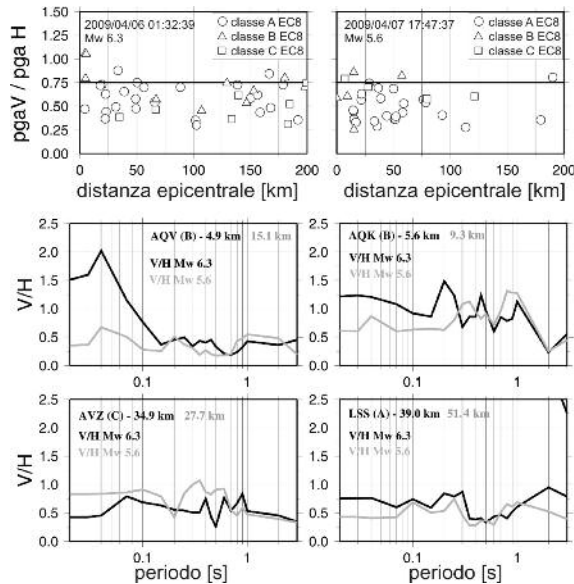


Fig. 8

Pannello in alto: andamento del rapporto tra il picco di accelerazione verticale e la media geometrica dei valori orizzontali in funzione della distanza epicentrale, per l'evento principale e la replica del 7 Aprile delle 17:47. I valori sono distinti per classi di sito. Pannelli in basso: Rapporto V/H tra la componente verticale e la media geometrica delle componenti orizzontali degli spettri di risposta in accelerazione per le stazioni AQV, AQK, AVZ e LSS, relativi all'evento principale e alla replica del 7 Aprile delle 17:47.



valori registrati durante il mainshock de L'Aquila e le relazioni empiriche ITA08 e AKBO07, e per gli spettri di risposta della figura 6, dove sono rappresentate in funzione dalla distanza R_{JB} e della categoria di suolo di fondazione, le ordinate spettrali di accelerazione (calcolate a partire dalla massima componente orizzontale) per periodi strutturali, T , pari 0.3 s, 1.0 s e 2.0 s. Di notevole interesse sono anche i dati in figura 7, che rappresentano i valori massimi di accelerazione registrata in occasione della replica principale della sequenza aquilana (2009/04/07 17:47:37, M_w 5.6). I valori di picco sono con-

frontati con le equazioni predittive ITA08 (pannelli in alto) e CF08 (pannelli in basso), in funzione, rispettivamente, di R_{JB} (confrontabile con la distanza epicentrale per questi valori di magnitudo) e distanza ipocentrale. Si nota in generale un buon adattamento ai dati, con tendenza per entrambi i modelli a sottostimare i livelli di accelerazione di picco (mH o mG) registrati su roccia a distanze inferiori a circa 20 km (ITA08) e 30 km (CF08). Risultati analoghi, non riportati in figura, si trovano anche nel caso della seconda replica più forte (2009/04/09 00:52:59, M_w 5.4).

1.5.5 Componenti verticali del moto

La figura 8 (pannello in alto) mostra il rapporto tra il valore di picco dell'accelerazione verticale rispetto alla media dei valori orizzontali in funzione della distanza, per l'evento principale e per la replica del 7 Aprile, ore 17:47. Si può notare

come i rapporti siano compresi indicativamente tra 0.25 e 0.75, e che la regola semplificata per cui il rapporto tra picco delle componenti verticale e orizzontale sia pari a 2/3 sia in media rispettata. Peraltro, si conferma un'indicazione già ben nota in letteratura (v. per es. Bozorgnia e Campbell,

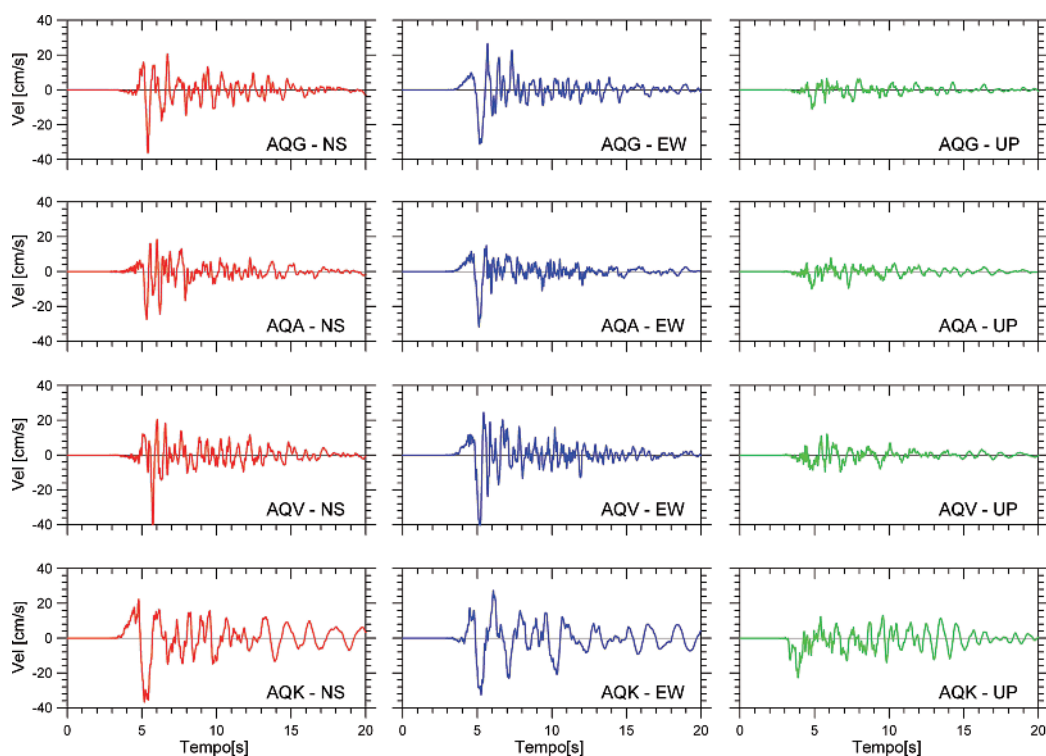


Fig. 9
Tracce di velocità (componenti Nord-Sud, in rosso, Est-Ovest in blu e verticale in verde) alle stazioni AQG, AQA, AQV e AQK, relative all'evento del 6 Aprile. Tutte le stazioni hanno distanza dalla faglia $R_{jb} = 0$.

2004), per la quale, a breve distanza dall'epicentro, il picco della componente verticale può eccedere l'orizzontale, anche in modo significativo. È inoltre da notare come il rapporto tra componenti verticali e orizzontali possa dipendere fortemente dal periodo, anche in funzione della distanza e delle condizioni di sito. A titolo di esempio, nei pannelli in basso della figura 8 si riporta il rapporto V/H tra lo spettro di risposta di accelerazione verticale (5% di smorzamento) e la media degli spettri orizzontali per 4 stazioni che hanno registrato sia l'evento principale che la replica del 7 Aprile ore 17:47, situate a diverse distanze dall'epicentro e in diverse condizioni di sito. Per l'evento principale, i rapporti V/H ad AQV

1.5.6 Caratteristiche del moto sismico nella zona epicentrale ed effetti in campo vicino

È noto da molti anni che le zone vicine alla sorgente di un terremoto possono essere interessate da significative variazioni spaziali del moto al suolo. Tali fenomeni sono legati alle direzioni prevalenti di propagazione della rottura e alla distribuzione dello spostamento sul piano di faglia e, a causa di essi, il moto sismico può presentare delle caratteristiche peculiari (Somerville et al., 1997). In particolare, la traccia di velocità può essere caratterizzata, nelle prime fasi, da un segnale a bassa frequenza e di breve durata (impulso) nel quale si concentra una parte consistente dell'energia presente nel segnale. Tale caratterizzazione del moto è detta di *campo vicino*, perché si può tipicamente

ed AQK hanno valori maggiori o uguali a 1 nell'intervallo di periodi 0 – 0.15 s e 0 – 1 s, rispettivamente, mentre le stazioni più lontane (LSS e AVZ) mostrano valori inferiori all'unità a tutti i periodi analizzati.

Per l'evento più debole, i rapporti si attestano su valori compresi tra 0.5 e 0.75 per le stazioni AQV e LSS, mentre valori più alti e prossimi ad 1 tra 0.2 e 1 s, si osservano ad AVZ e AQK. Benché entrambe le stazioni appartengano alla classe B, i segnali registrati sono caratterizzati dalla presenza di onde di superficie che amplificano il moto verticale, generate probabilmente dalle complesse strutture geomorfologiche presenti nei pressi delle stazioni.

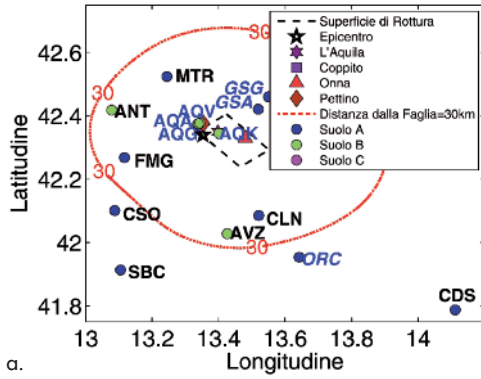
osservare nelle zone con distanza dalla faglia non superiore alle dimensioni della sorgente.

La figura 9 mostra, a titolo di esempio, le serie temporali di velocità durante l'evento principale, ottenute a tre stazioni del transetto della valle dell'Aterno e ad AQK, nelle quali è visibile in modo evidente tale impulso, in particolare lungo le componenti EW ed alla stazione AQK.

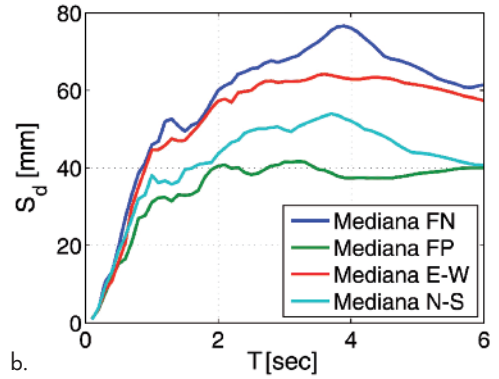
I segnali di tipo impulsivo sono rilevanti per l'ingegneria strutturale per tre motivi fondamentali: (1) la domanda di spostamento elastica è generalmente superiore in direzione normale alla rottura rispetto alla direzione parallela; (2) la forma spettrale è caratterizzata da un andamento peculiare in un campo di periodi intorno a quello caratteristico dell'impulso (T_p); (3) essendo

Fig. 10

(a) Rappresentazione in pianta della superficie di rottura e delle stazioni RAN con distanza dalla faglia minore di circa 60 km; La geometria della rottura riportata in figura è leggermente diversa da quella descritta in precedenza e fa riferimento a quanto riportato in (Chioccarelli e Iervolino, 2009a). Le differenze, tuttavia, non influenzano sostanzialmente i risultati discussi. (b) Spettri di spostamento mediani delle stazioni impulsive.



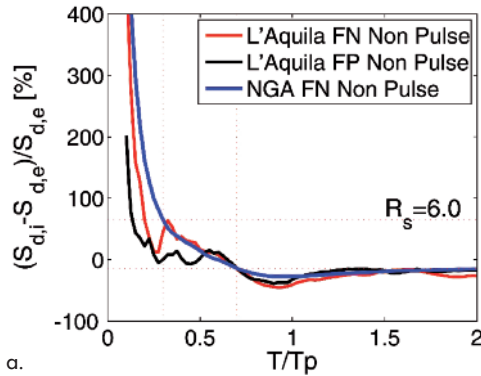
a.



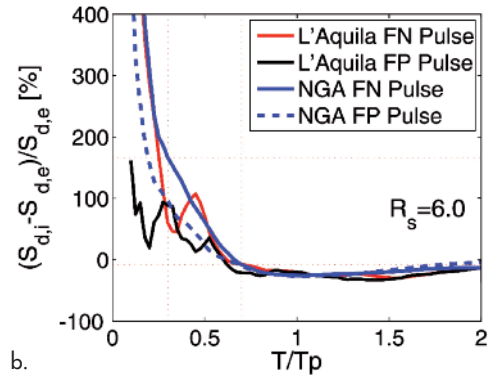
b.

Fig. 11

Rapporto tra la domanda di spostamento inelastica ed elastica nel caso di stazioni non impulsive (a) ed impulsive (b).



a.



b.

l'impulso generalmente a bassa frequenza (comparabile con i periodi fondamentali tipici delle strutture), la domanda inelastica associata al segnale può essere particolarmente intensa. Nel seguito si descrive brevemente l'analisi per l'individuazione degli effetti di campo vicino nell'evento principale de L'Aquila e la caratterizzazione della corrispondente azione sismica.

Baker (2007) ha sviluppato un metodo per identificare le storie di velocità con un impulso all'inizio del segnale, e che quindi verosimilmente derivano da effetti di campo vicino, assegnando a ciascun record un indice compreso tra 0 ed 1. I segnali con indice maggiore di 0.85 e minore di 0.15 sono convenzionalmente classificati rispettivamente come impulsivi e non impulsivi. Sono invece ritenuti ambigui i segnali con indice compreso tra 0.15 e 0.85. Il metodo è stato utilizzato per l'analisi dei segnali del terremoto de L'Aquila registrati dalle stazioni della Rete Accelerometrica Nazionale (RAN). Gli stessi sono stati ruotati, rispetto alle direzioni originali EW e NS, nelle direzioni ortogonale (FN) e parallela (FP) allo strike della faglia sorgente, in quanto è nella direzione FN che ci si attende di trovare gli effetti impulsivi più significativi (Somerville et al., 1997). In particolare, sono stati processati i segnali delle 13 stazioni con distanza dalla faglia inferiore a circa 30 km.

Di questi, secondo il metodo di Baker (2007), 7 presentano una delle componenti orizzontali di tipo impulsivo: 6 in direzione FN e una sola in dire-

zione FP (stazione AQV). Peraltro, in quest'ultimo caso, la componente FN del segnale è classificata come ambigua.

In figura 10a si riporta la proiezione in superficie della superficie di rottura con la localizzazione dell'epicentro, il codice identificativo delle stazioni RAN (in blu quelle con segnali impulsivi), la classificazione dei suoli ed alcuni dei centri abitati più danneggiati. In Tabella 3 sono riportate le caratteristiche dei segnali delle 13 stazioni considerate così come ottenute dall'analisi tramite l'analisi di Baker. Per i dettagli sull'identificazione si rimanda a Chioccarelli e Iervolino (2009a). Le stesse analisi sono state condotte anche sulle componenti non ruotate delle medesime stazioni identificando 5 segnali impulsivi in direzione Est-Ovest e 4 in direzione Nord-Sud. La mancanza di sistematicità dei risultati sembra confermare la necessità di studiare il fenomeno nelle direzioni FN e FP.

In figura 10b sono riportati gli spettri elastici di spostamento (Sd) mediani delle sette stazioni impulsive per le 4 direzioni considerate. La figura mostra che la rotazione in direzione FN e FP permette di identificare le domande di spostamenti rispettivamente massime e minime rispetto alle componenti non ruotate.

Per studiare la domanda sismica inelastica associata ai segnali del terremoto de L'Aquila, si è fatto riferimento a una serie di oscillatori elasto-plastici ad un grado di libertà (SDoF), con rapporto di incrudimento del 3%, smorzamento del 5% e fat-

tore di riduzione della resistenza (R_s = rapporto tra forza elastica massima e di snervamento) pari a 6. I risultati sono rappresentati come andamento medio dell'incremento della domanda di spostamento inelastica, $S_{d,i}(T)$, rispetto a quella elastica, $S_{d,e}(T)$, al variare del periodo (T) del sistema SDOF. I grafici ottenuti sono riportati in figura 11 (l'asse delle ascisse è adimensionale rispetto al periodo T_p del singolo segnale, identificato mediante algoritmo di Baker) e sono riferiti alle componenti FN e FP delle registrazioni, sia nel caso di stazioni impulsive che non impulsive. Come riferimento si riportano gli stessi andamenti calcolati sui dati del Next Generation Attenuation (NGA) Project database, analizzati con lo stesso algoritmo utilizzato per i dati aquilani.

L'andamento riportato per le stazioni non impulsive (*Non Pulse*) dei dati NGA, è da ritenersi ordinario e rispetta, di fatto, l'*equal displacement rule*. Nel caso di stazioni impulsive (*Pulse*), si registra invece un incremento significativo di spostamento

1.5.7 Conclusioni

Per la qualità e la numerosità dei dati, per il campo di magnitudo e distanze coperto, per la varietà di condizioni geologiche interessate, la sequenza sismica aquilana ha fornito un insieme di dati di eccezionale interesse scientifico ed ingegneristico, le cui implicazioni saranno di grande rilievo sia per approfondire la conoscenza sul moto sismico in occasione di eventi relativamente frequenti sul territorio nazionale, sia per migliorare la definizione delle azioni sismiche di progetto, in particolare in prossimità della zona epicentrale.

La variazione dei parametri di picco del moto sismico con la distanza è in linea con quanto previsto dalle più recenti leggi empiriche per la predizione del moto. Risulta però l'evidenza di una anisotropia nella distribuzione spaziale delle linee ad uguale valore di picco, che tendono ad allungarsi in direzione SE, seguendo la direzione della propagazione della rottura lungo la faglia sismogenetica. Inoltre l'attenuazione con la distanza dei valori di picco appare più marcata verso Ovest, probabilmente a causa delle diverse caratteristiche del mezzo di propagazione in direzione Tirrenica rispetto a quella Adriatica.

La severità del moto sismico nella zona epicentrale, durante l'evento principale, risulta ben stimata dalle relazioni empiriche di attenuazione calibrate su insiemi di dati abbastanza ampi e comprendenti un numero sufficiente di registrazioni in campo vicino, mentre l'uso dei soli dati italiani, carente di registrazioni da terremoti medio-forti in campo

inelastico per T/T_p compreso tra 0.3 e 0.7. In particolare, alle componenti FN dei dati NGA corrispondono incrementi pari circa al 170% ed al -10% rispettivamente all'estremo inferiore e superiore dell'intervallo considerato. Tale risultato è una diretta conseguenza della forma spettrale dei segnali impulsivi in quanto il passaggio in campo inelastico del sistema comporta una *elongazione* del periodo elastico, che può diventare circa il doppio di quello di partenza (approssimandosi quindi al periodo di impulso T_p). Per quanto riguarda la componente FP, i dati NGA forniscono incrementi minori ma non del tutto equivalenti al caso dei segnali non impulsivi.

I dati de L'Aquila, sebbene poco regolari probabilmente a causa del limitato numero di osservazioni disponibili, appaiono coerenti con le ben più robuste analisi dei dati NGA, confermando l'importanza degli effetti di campo vicino nella risposta strutturale durante il terremoto aquilano (Chioccarelli e Iervolino, 2009b).

vicino fino a prima del terremoto de L'Aquila, porta ad una leggera sottostima delle ampiezze.

In linea con osservazioni già ben documentate in letteratura, le componenti verticali di accelerazione presentano valori di picco simili, e talora più elevati, rispetto a quelle orizzontali nella zona epicentrale, mentre a distanze più elevate e tendono ad assestarsi su valori mediamente ben predetti dal classico rapporto 2/3. Rimane da studiare con maggiore dettaglio l'andamento con il periodo del rapporto V/H in funzione della magnitudo, della distanza e delle condizioni di sito e le relative implicazioni in termini di definizione dell'azione sismica verticale di progetto.

Si è infine investigato l'effetto della natura impulsiva del moto sismico in campo vicino sulla domanda sismica strutturale nell'evento principale della sequenza aquilana. In particolare, analisi su semplici oscillatori elasto-plastici ad un grado di libertà hanno evidenziato che alle stazioni identificate come impulsive è associata una domanda non lineare di spostamento peculiare e generalmente compatibile con quanto atteso per segnali che risentono della direzionalità. Tali risultati sembrano quindi confermare la necessità di approfondire gli studi per la definizione delle azioni sismiche in condizioni di campo vicino, individuando in particolare quelle caratteristiche del moto sismico, sia in termini di ampiezza che di durata e contenuto in frequenza, la cui corretta quantificazione può avere riscontri di grande utilità sia nella progettazione delle costruzioni che nella valutazione del rischio sismico.

Tabella 1 - Stazioni accelerometriche RAN (da #1 a #65) e INGV MI-PV (da #66 a #69), che hanno registrato la sequenza sismica abruzzese. Sono riportate le coordinate geografiche, la categoria di suolo seguendo la classificazione EC8 e il numero di registrazioni disponibile per ogni stazione

#	Code	Station name	Lat. [N] [°]	Lon. [E] [°]	Site class	#rec
1	AMT	AMATRICE	42.6325	13.2862	A*	1
2	ANT	ANTRODOCO	42.4180	13.0790	B*	12
3	AQA	L'AQUILA - V. Aterno - F. Aterno	42.3760	13.3390	B*	6
4	AQF	L'AQUILA - V. Aterno - Ferriera	42.3805	13.3547	B*	1
5	AQG	L'AQUILA - V. Aterno - Colle Grilli	42.3730	13.3370	A*	10
6	AQK	Aquil PARK ing.	42.3450	13.4010	B*	13
7	AQM	L'AQUILA - V. Aterno - Il Moro	42.3786	13.3493	A*	10
8	AQP	L'AQUILA - V. Aterno - Pettino	42.3837	13.3686	A*	7
9	AQV	L'AQUILA - V. Aterno - Centro Valle	42.3770	13.3440	B	12
10	ASS	ASSISI	43.0750	12.6040	A*	6
11	AVL	AVELLINO	40.9230	14.7870	B*	1
12	AVZ	AVEZZANO	42.0270	13.4260	B*	10
13	BBN	BIBBIENA	43.7480	11.8210	A*	1
14	BDT	BADIA TEDALDA	43.7070	12.1880	A*	2
15	BNE	BENEVENTO	41.1280	14.7850	B*	1
16	BOJ	BOJANO	41.4840	14.4720	B*	4
17	BRS	BARISCIANO	42.3239	13.5903	B*	6
18	BZZ	BAZZANO	42.3370	13.4686	C*	7
19	CAN	CANDELA	41.2030	15.4750	A*	1
20	CDS	CASTEL DI SANGRO	41.7870	14.1120	A*	3
21	CHT	CHIETI	42.3700	14.1480	B	9
22	CLN	CELANO	42.0850	13.5210	A*	7
23	CMB	CAMPOBASSO	41.5630	14.6520	A*	1
24	CMR	CASTELMAURO	41.8330	14.7120	A*	2
25	CNM	CASALNUOVO MONTEROTARO	41.6180	15.1050	B*	1
26	CSO1	CARSOLI 1	42.1000	13.0880	A*	6
27	CSS	CASSINO	41.4860	13.8230	A*	3
28	CTL	CATTOLICA	43.9550	12.7360	B*	2
29	FMG	FIAMIGNANO	42.2680	13.1170	A*	10
30	FOR	FORLÌ	44.1990	12.0420	C	1
31	GNL	GENZANO DI LUCANIA	40.8430	16.0330	A*	1
32	GSA	GRAN SASSO (Assergi)	42.4210	13.5190	A*	9
33	GSG	GRAN SASSO (Lab. INFN galleria)	42.4600	13.5500	A*	6
34	ISR	ISERNIA	41.6110	14.2360	C*	1
35	LSS	LEONESSA	42.5580	12.9690	A*	8
36	MMP	MOMPEO 1	42.2490	12.7480	A*	7
37	MNG	MONTE S. ANGELO	41.7040	15.9580	A*	1
38	MNN	MANFREDONIA	41.6340	15.9110	A*	2
39	MTR	MONTEREALE	42.5240	13.2450	A*	10
40	NAP	NAPOLI Ovest	40.7990	14.1800	C*	1
41	NOR	NORCIA	42.7924	13.0924	B*	3
42	ORC	ORTUCCHIO	41.9540	13.6420	A*	11
43	PDM	PIEDIMONTE MATESE	41.3550	14.3850	C*	1
44	PIC	PIANCASTAGNAIO	42.8500	11.6850	B*	2
45	PSC	PESCASSEROLI	41.8120	13.7892	A*	2
46	PTF	PETRELLA TIFERNINA	41.6960	14.7020	B*	3
47	RIC	RICCIA	41.4830	14.8380	B*	1
48	SBC	SUBIACO	41.9130	13.1060	A*	2
49	SCM	S. CROCE DI MAGLIANO	41.7110	14.9840	B*	1
50	SCN	SCANNO	41.9187	13.8724	C*	4
51	SCP	SERRACAPRIOLA	41.8070	15.1650	B*	3
52	SDG	S. GIOVANNI ROTONDO	41.7090	15.7330	A*	1
53	SEP	S. ELIA A PIANISI	41.6250	14.8800	A*	1
54	SNM	SAN MARINO	43.9340	12.4490	A*	2
55	SNS	SANSEPOLCRO	40.2430	15.5500	C*	2
56	SPC	SPOLETO (cantina)	42.7430	12.7400	C*	7
57	SPO	SPOLETO	42.7340	12.7410	A*	7
58	SSR	S. SEVERO	41.6910	15.3740	B	1
59	STL	SATRIANO DI LUCANIA	40.5410	15.6420	A*	1
60	STN	STURNO	41.0180	15.1120	A*	1
61	SUL	SULMONA	42.0890	13.9340	A*	7
62	TLS	TELESE TERME	41.2220	14.5300	A*	1
63	TMO	TERMOLI	41.9890	14.9750	B*	3
64	VIE	VIESTE	41.8770	16.1650	A*	1
65	VRP	VAIRANO PATENORA	41.3330	14.1320	A*	1
66	MI02	PAGANICA	42.3544	13.4745	C*	12
67	MI01	PESCOMAGGIORE	42.3577	13.5109	A*	12
68	MI03	ONNA	42.3274	13.4757	C*	11
69	MI05	S. EUSANIO FORCONESE	42.2890	13.5251	C*	12

* classi EC8 attribuite sulla base delle informazioni geologiche/geofisiche disponibili. (Progetto S4 project, <http://esse4.mi.ingv.it>)

Tabella 2 - Coordinate degli epicentri (Latitudine, Lat., longitudine, Lon. e Profondità, H,) magnitudo locale, M_l , magnitudo momento M_w , strike, dip e rake dei 13 eventi della sequenza abruzzese analizzati in questi studio

Data*	ora yyyyymmdd ora (UTC)* hhmmss	Lat.(N)* [°]	Lat.(E)* [°]	H* [km]	M_l^*	M_w^*	Strike+ [°]	Dip+ [°]	Rake+ [°]
20090406	013240	42.348	13.380	9.5	5.8	6.3	147.0	43.0	-88.0
20090406	023704	42.366	13.340	10.1	4.6	5.1	124.0	62.0	-118.0
20090406	163809	42.362	13.333	10.2	4.0	4.4	143.0	50.0	-123.0
20090406	231537	42.451	13.364	8.6	4.8	5.1	133.0	53.0	-108.0
20090407	092628	42.342	13.338	10.2	4.7	5.0	137.0	56.0	-99.0
20090407	174737	42.275	13.464	15.1	5.3	5.6	109.0	51.0	-124.0
20090407	213429	42.380	13.376	7.4	4.2	4.6	112.0	51.0	-102.0
20090408	225650	42.507	13.364	10.2	4.3	4.1	136.0	71.0	-102.0
20090409	005259	42.484	13.343	15.4	5.1	5.4	148.0	40.0	-90.0
20090409	031452	42.338	13.437	18.0	4.2	4.4	326.0	66.0	-29.0
20090409	043244	42.445	13.420	8.1	4.0	4.2	127.0	62.0	-139.0
20090409	193816	42.501	13.356	17.2	4.9	5.3	146.0	43.0	-75.0
20090413	211424	42.504	13.363	7.5	4.9	5.1	133.0	59.0	-116.0

*da Bollettino INGV-CNT Bulletin; +da RCMTINGV; la localizzazione del mainshock è ottenuta utilizzando le registrazioni sismiche delle reti nazionali, regionali e temporanee (INGV, 2009).

Tabella 3 - Classificazione dei segnali impulsivi e non, con PGV [cm/sec] e periodo dell'impulso T_p [s]

Stazioni	AQV	AGG	AQA	AQK	GSA	CLN	AVZ	MTR	GSG	FMG	ANT	CSO	ORC
FN PGV	37.6	34.1	28.7	45.0	10.9	5.5	13.1	4.1	3.7	2.1	2.3	2.2	6.7
Impulsivo	NO	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	SI
T_p	0.5	1.0	0.74	2.0	3.1	5.2	1.9	2.6	4.0	4.0	1.0	4.8	0.8
FP PGV	31.4	26.6	19.9	16.7	6.0	5.8	9.9	3.0	2.3	1.9	2.0	1.5	2.9
Impulsivo	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
T_p	1.1	1.1	0.6	1.3	2.0	4.8	1.6	2.2	5.2	4.8	2.8	2.2	4.5

Ringraziamenti

In questo lavoro si è fatto principalmente uso delle registrazioni accelerometriche della RAN, gestita e mantenuta dal Dipartimento della Protezione Civile - Servizio Monitoraggio del Territorio e Gestione Banche Dati - Ufficio Valutazione, Prevenzione e Mitigazione del Rischio Sismico. Le attività di mantenimento e migliora-

mento della banca dati ITACA (<http://itaca.mi.ingv.it>) sono finanziate dal DPC nell'ambito del Progetto S4 della convenzione DPC-INGV 2007-09. Parte del lavoro svolto e presentato in questo articolo si inserisce nell'ambito delle attività del Consorzio ReLUIS - Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica (<http://www.reluis.it/>).

Bibliografia

- Akkar S., Bommer J.J. (2007a) - Empirical prediction equations for peak ground velocity derived from strong-motion records from Europe and the Middle East, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 97 (2), 511-530.
- Akkar S., Bommer J.J. (2007b) - Prediction of elastic displacement response spectra in Europe and the Middle East, *Earthquake Eng. and Struc. Dyn.*, 36, 1275-1301.
- Ameri A., Massa M., Bindi D., D'Alema E., Gorini A., Luzi L., Marzorati S., Pacor F., Paolucci R., Puglia R., Smerzini C. (2009) - The 6 April 2009, M_w 6.3, L'Aquila (Central Italy) earthquake: strong-motion observations, accettato per pubblicazione in *Seismol. Res. Letters*.
- Anzidei M., Boschi E., Cannelli V., Devoti R., Esposito A., Galvani A., Melini D., Pietrantonio G., Riguzzi F., Sepe V., Serpelloni E. (2009) - Coseismic deformation of the destructive April 6, 2009 L'Aquila earthquake (central Italy) from GPS data, *Geophys. Res. Lett.* (in stampa).
- Atzori S., Hunstad I., Chini M., Salvi S., Tolomei C., Bignami C., Stramondo S., Trasatti E., Antonioli A., Boschi E. (2009) - Finite fault inversion of DInSAR coseismic displacement of the 2009 L'Aquila earthquake (central Italy), *Geophys. Res. Lett.*, 36, L15305, doi:10.1029/2009GL039293.
- Baker J.W. (2007) - Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions Using Wavelet Analysis, *Bulletin of Seismological Society of America*, 97: 1486-1501.
- Bindi D., Luzi L., Massa M., Pacor F. (2009) - Horizontal and vertical ground motion prediction equations derived from the Italian Accelerometric Archive (ITACA), *Bull. Of Earth. Eng.*, in stampa
- Bozorgnia Y., Campbell K.W. (2004) - The Vertical-to-Horizontal Spectral Ratio and tentative Procedures for Developing Simplified V/H and Vertical Design Spectra, *Journal of Earthquake Engineering*, 8 (2): 175-207.
- Cauzzi C., Faccioli E. (2008) - Broadband (0.05 to 20s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records, *J. Seismol.*, 12(4): 453-475.
- CEN (2004) - Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, Comité Européen de Normalisation Brussels, May.
- Chioccarelli E., Iervolino I. (2009a) - Direttività ed azione sismica: discussione per l'evento de L'Aquila, *Atti di XIII Convegno ANIDIS 2009 "L'Ingegneria Sismica in Italia"*, Bologna, Italia.

- Chioccarelli E., Iervolino I. (2009b) - Near-Source Seismic Demand and Pulse-Like Records: a Discussion for L'Aquila Earthquake, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (Proposto per la Pubblicazione).
- Faccioli E., Paolucci R. (2005) - *Elementi di Sismologia applicata all'Ingegneria*. Pitagora ed.
- Hanks T.C., McGuire R.K. (1981) - The character of high-frequency strong ground motion, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 71, 2071-2095.
- Luzi L., Hailemichael S., Bindi D., Pacor F., Mele F., Sabetta F. (2008) - ITACA (Italian Accelerometric Archive): a web portal for the dissemination of Italian strong-motion data, *Seismol. Res. Letters*, 79, 716-722.
- Massa M., Pacor F., Luzi L., Bindi D., Milana G., Sabetta F., Gorini A., Marocchi C. (2009) - The Italian Accelerometric Archive (ITACA): processing of strong motion data, in pubblicazione in *Bull. of Earth. Eng.*
- S4 project - Deliverable D4 (2009) - Progress report on the ongoing activity for constructing a catalogue of geological/geotechnical information at accelerometric stations. Available from <http://esse4.mi.ingv.it/>
- Somerville P.G., Smith N.F., Graves R.W., Abrahamson N.A. (1997) - Modification of Empirical Strong Motion Attenuation Relations to Include the Amplitude and Duration Effect of Rupture Directivity, *Seismological Research Letters*, 68: 199-122.008-9098y.