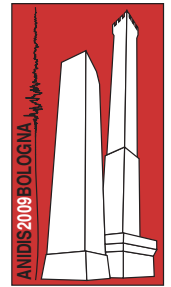


# Direttività e azione sismica: discussione per l'evento de L'Aquila.

Eugenio Chioccarelli e Iunio Iervolino

*DIST – Dipartimento di Ingegneria Strutturale. Università degli Studi di Napoli Federico II. Via Claudio 21, 80125 Napoli.*



*Keywords: Direttività, terremoti impulsivi, domanda inelastica di spostamento.*

## ABSTRACT

La direttività è un fenomeno conosciuto da tempo in ambito sia sismologico sia di ingegneria sismica; esso può provocare variazioni spaziali del campo di moto nelle zone vicine alla sorgente del terremoto. In particolare, in siti che si trovano in una particolare configurazione geometrica rispetto alla rottura, il segnale sismico in termini di velocità, nella componente ortogonale alla rottura, può presentare un ciclo a bassa frequenza in cui è concentrata molta dell'energia portata in dote dal segnale. A ciò è associata una forma spettrale peculiare diversa da quella dei terremoti cosiddetti ordinari, cioè che sono registrati lontano dalla sorgente o che non sono nelle condizioni favorevoli al manifestarsi degli effetti di direttività. Le leggi di attenuazioni e le analisi di pericolosità sismica tradizionali non sono calibrate per tenere in conto in modo appropriato del fenomeno. Per questo, le strutture che hanno un periodo di oscillazione (lineare o *elongato*) in un certo rapporto con quello dell'impulso possono essere soggette a domanda di spostamento non opportunamente stimata.

Nel lavoro si discute un tentativo di identificazione di eventuali effetti di direttività nei dati registrati per l'evento principale della recente sequenza sismica Abruzzese. I risultati sembrano indicare la presenza di tali effetti in diversi segnali registrati più vicino alla sorgente e in relativo accordo con i modelli previsionali esistenti. Tuttavia, le procedure utilizzate non sono ancora del tutto consolidate, per cui tale analisi deve essere considerata preliminare e da approfondire ulteriormente.

## 1 INTRODUZIONE

Al verificarsi di un evento sismico, le zone vicine alla sorgente possono essere interessate da fenomeni chiamati dai sismologi di *direttività*. Tali effetti *near-source* sono legati alle direzioni prevalenti di propagazione della rottura e dello scorrimento (*slip*) sulla faglia e a causa di essi il moto al suolo di un sito che si trova in determinate condizioni geometriche rispetto alla sorgente può presentare delle caratteristiche peculiari. In particolare, la storia di velocità in direzione ortogonale alla faglia può presentare, nelle prime fasi del segnale, un ciclo a bassa frequenza (impulso) nel quale si concentra gran parte dell'energia generata dal sisma. Questo accade se la velocità delle onde di taglio è circa uguale a quella di propagazione della rottura verso il sito, se il sito vede arrivare la rottura verso di sé e se il sito stesso è anche allineato con lo *slip* sulla faglia (Somerville *et al.* 1997).

Ciò che succede è schematicamente rappresentato in Figura 1, per semplicità relativa a un terremoto *Strike-Slip* (Reiter, 1990). In modo grossolano si può dire che discretizzando la rottura in sorgenti puntiformi di onde

meccaniche, la parte iniziale della rottura irradia prima verso il sito mentre quella successiva irradia dopo ma deve percorrere meno strada, questo può determinare interferenza costruttiva delle onde e quindi l'innesco di un impulso a bassa frequenza e alta energia (Sito 2). Lontano dalla sorgente o per siti che vedono allontanarsi da sé la rottura questo effetto si perde o non è affatto presente e l'energia portata in dote dal segnale è distribuita più uniformemente (Sito 1).

Gli effetti della direttività, visti in questi termini sono, da tempo di interesse per l'ingegneria sismica. Infatti, si possono tradurre, in termini strutturali, in una domanda sismica (lineare e/o non lineare) particolarmente severa in corrispondenza di particolari ordinate spettrali (Tothong e Cornell, 2006). Ad esempio, strutture che hanno un periodo fondamentale di oscillazione pari a una certa frazione del periodo corrispondente all'impulso nella storia di velocità, andando in campo non lineare ed essendo soggette ad *elongazione* del periodo, possono trovarsi in condizioni per cui sono particolarmente sensibili all'impulso e quindi possono avere una richiesta inelastica anomala.

Sebbene questo fenomeno sia noto da tempo, non è facile una quantificazione del rischio

associato alla direttività, sia perché non sempre esso si manifesta chiaramente in tutte le registrazioni di un terremoto dove è atteso sia perché una corretta valutazione ai fini di progettazione strutturale richiede anche la prevedibilità delle caratteristiche di periodo e di ampiezza dell'impulso.

Le correnti leggi di attenuazione e quindi l'analisi probabilistica di pericolosità sismica classica (Bazzurro e Cornell, 1999), non sono in grado di tenere opportunamente in conto la forma spettrale peculiare di questo tipo di terremoti e quindi di stimare la domanda sismica che ne deriva. Per questo motivo, recentemente, sono stati proposti adattamenti dell'analisi di pericolosità e di rischio sismico in tali condizioni (Iervolino e Cornell, 2008).

Nel seguito del lavoro gli aspetti di interesse strutturale della direttività sono analizzati e discussi in relazione al *mainshock* del terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009. In particolare le analisi sono state condotte lungo due direttrici principali: la prima, basata su una stima della geometria della rottura e relativa all'applicazione al caso abruzzese di modelli previsionali degli effetti della direttività, la seconda, invece, è relativa all'analisi dei segnali registrati in condizioni near-source per identificare eventuali impulsi di velocità presumibilmente legati alla direttività e conseguenti incrementi della domanda sismica sulle strutture.

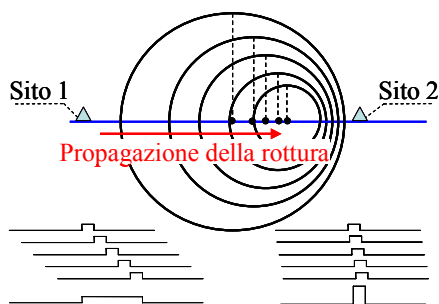


Figura 1. Rappresentazione schematica del fenomeno di direttività nel caso strike-slip (adattata da Kramer, 1996).

## 2 CARATTERISTICHE DELLA SORGENTE E DATI DELL'EVENTO

I risultati degli studi sismologici hanno mostrato che il terremoto dell'Abruzzo, di magnitudo momento ( $M_w$ ) 6.2, è stato di tipo *normale* o *dip-slip*, con superficie di rottura rettangolare di circa  $17 \times 14 \text{ km}^2$  e posizionata ad una profondità compresa tra 11.8 e 0.6 km dal piano campagna. Il piano di rottura inoltre forma un angolo di  $142^\circ$  con la direzione N-S (*strike*), ha una pendenza di  $50^\circ$  (*dip*) ed una direzione di scorrimento di  $90^\circ$  rispetto alla proiezione del piano di rottura in

superficie (*rake*) (D. Cheloni<sup>†</sup>, comunicazione scritta). Le coordinate dei vertici ( $V_{\text{faglia}}$ ) della rottura nonché dell'ipocentro sono riportate in Tabella 1.

I dati appena descritti non sono identificati univocamente da tutti gli studiosi del settore, ma le diverse stime reperibili, non sono comunque molto diverse tra loro e quindi i dati forniti sono assunti nel prosieguo.

Tabella 1. Coordinate superficie di rottura ed ipocentro.

	$V_{\text{faglia}}$ 1	$V_{\text{faglia}}$ 2	$V_{\text{faglia}}$ 3	$V_{\text{faglia}}$ 4	Ipocentro
Longitudine ( $^\circ$ )	13.424	13.552	13.465	13.336	13.353
Latitudine ( $^\circ$ )	42.405	42.293	42.238	42.351	42.340
Profondità (km)	0.600	0.600	11.800	11.800	11.800

La propagazione della rottura sembra essere avvenuta prima in direzione parallela al lato corto della faglia (*up-dip*) per poi propagarsi in direzione ortogonale alla precedente (V. Convertito<sup>+</sup>, comunicazione personale).

Le registrazioni dell'evento principale di cui si dispone sono quelle registrate dalle stazioni appartenenti alla Rete Accelerometrica Nazionale (RAN) del Dipartimento della Protezione Civile. Esse sono disponibili, in forma non corretta, al sito <http://www.protezionecivile.it/>. Le forme d'onda in accelerazione sono state corrette dagli autori tramite correzione lineare della baseline e filtro Butterworth Bandpass (Freq 1 = 0.1 Hz, Freq 2 = 25 Hz, Ordine = 4); si veda Chioccarelli *et al.* (2009) per ulteriori dettagli sui segnali registrati.

In Figura 2 si riporta la rappresentazione in pianta del piano di rottura insieme con la localizzazione dell'epicentro, le sigle RAN delle registrazioni delle stazioni accelerometriche disponibili, le relative tipologie di suolo (F. Pacor<sup>•</sup>, comunicazione personale) e i centri abitati tra i più danneggiati (Verderame *et al.*, 2009).

<sup>†</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, CNT, Roma.

<sup>+</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Vesuviano, c/o Laboratorio RISSC, Napoli.

<sup>•</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Milano.

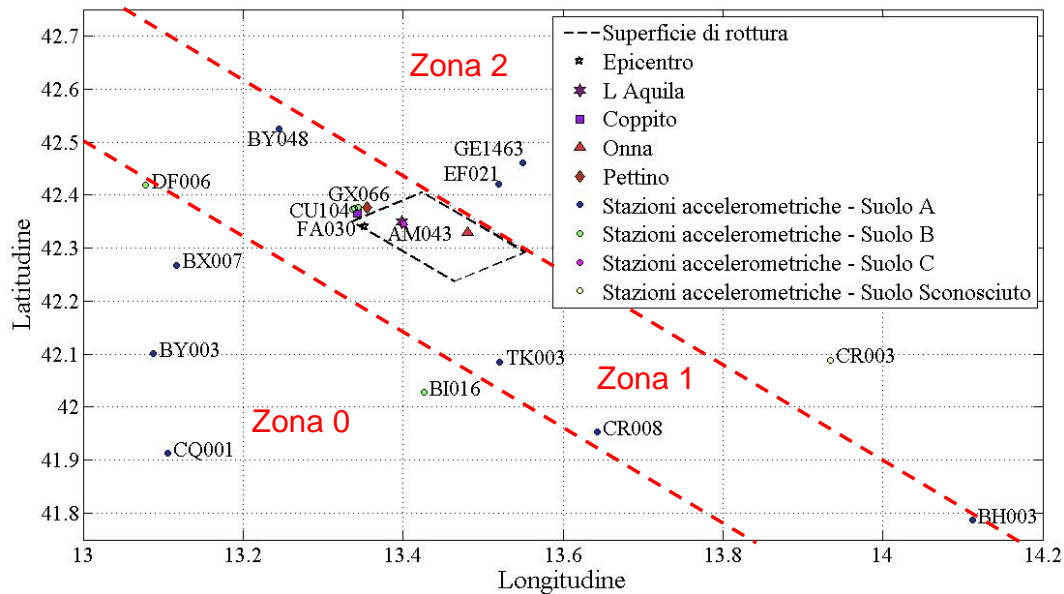


Figura 2. Rappresentazione geografica della superficie di rottura e della disposizione delle stazioni accelerometriche.

### 3 ANALISI DELLA DIRETTIVITÀ

Somerville *et al.* (1997) hanno identificato tre condizioni necessarie per il verificarsi degli effetti della direttività nei segnali velocimetrici:

1. la propagazione del fronte di rottura deve avvenire nella direzione del sito;
2. la direzione dello scorrimento deve essere allineata con il sito;
3. la velocità di propagazione della rottura verso il sito deve essere paragonabile alla velocità di propagazione delle onde di taglio.

Qualora tutte queste condizioni siano verificate, il sito può essere raggiunto contemporaneamente da onde sismiche partite da diversi punti della rottura in diversi istanti. Il sovrapporsi di tali onde determina l'impulso di velocità precedentemente descritto.

Nel caso di rottura *strike-slip*, l'impulso si registra sulle componenti orizzontali del segnale e soprattutto in direzione ortogonale allo strike essendo quest'ultima anche la direzione ortogonale alla propagazione della rottura, mentre questo effetto si dovrebbe manifestare in entità ben minore in direzione parallela.

Anche nel caso *dip-slip*, la componente impulsiva del segnale è in direzione ortogonale al piano di rottura e di conseguenza ha componenti sia nel piano orizzontale che nel piano verticale (Somerville, 2005), Figura 3.

Nell'ambito di questo lavoro si parlerà semplicemente di direzioni *fault-normal* (FN) e *fault-parallel* (FP).

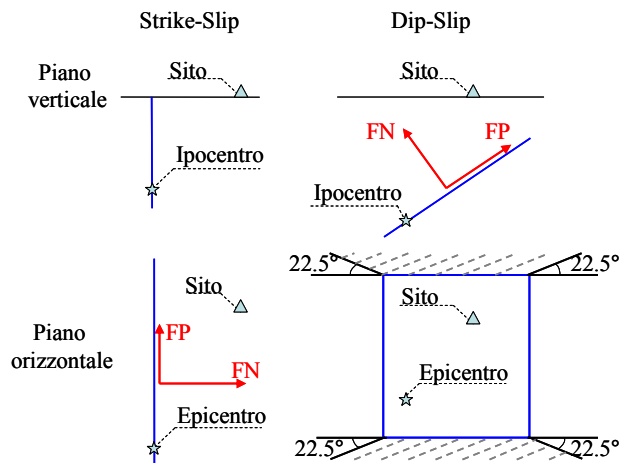


Figura 3. Differenze tra terremoti strike slip e dip-slip (adattata da Somerville, 1997).

Somerville *et al.* (1997) hanno anche identificato alcuni parametri geometrici che caratterizzano e/o possono favorire il manifestarsi degli effetti di direttività nel segnale sulla base dei quali hanno proposto un modello di previsione dell'ampiezza della risposta spettrale.

Tali parametri, nel caso di faglie normali, sono stimati nel piano verticale ortogonale alla superficie di rottura<sup>1</sup>.

Essi sono:

- distanza minima del sito dalla rottura (R);
- proiezione sulla retta di rottura della distanza del sito dall'ipocentro (d);
- azimuth tra la retta che rappresenta la rottura e la distanza sito-ipocentro ( $\varphi$ ).

<sup>1</sup> Somerville *et al.* (1997) hanno escluso dal loro studio i punti del piano orizzontale ai lati della faglia indicati con aree tratteggiate di Figura 3.

Il modello proposto non teneva conto della dipendenza del periodo dell'impulso ( $T_p$ ) dalle caratteristiche del singolo terremoto. È stato osservato in seguito che  $T_p$  dipende dalla magnitudo dell'evento (e.g., Somerville, 2001).

#### 4 PREVEDIBILITÀ E CALCOLO DELLA PROBABILITÀ DI IMPULSO

Utilizzando gli stessi parametri geometrici (o combinazioni di questi) identificati da Somerville et al. (1997) oltre che la magnitudo dell'evento, Iervolino e Cornell (2008) hanno studiato diversi modelli previsionali che restituiscono la probabilità di registrare un segnale impulsivo derivante dalla direttività.

Tali modelli sono stati ottenuti tramite regressioni logistiche delle componenti normali dei records contenuti nel database del Next Generation Attenuation of Ground Motion (NGA) Project ([http://peer.berkeley.edu/products/nga\\_project.html](http://peer.berkeley.edu/products/nga_project.html)) precedentemente ruotati e classificati come impulsivi o meno da Baker (2007) (della classificazione si discuterà nel seguito).

Si sottolinea che il modello di occorrenza di fenomeni impulsivi è stato sviluppato ai fini di mettere a punto una procedura per l'analisi probabilistica di pericolosità sismica in condizioni near-source in cui vanno anche incluse relazioni che legano l'ampiezza dell'impulso e il  $T_p$  alle caratteristiche dell'evento (Iervolino e Cornell, 2008; Tothong et al., 2007).

Tra i modelli analizzati, quello considerato nell'ambito di questo studio è quello che utilizza i tre parametri geometrici di cui sopra, Equazione (1), in cui la probabilità di osservare segnali impulsivi nel segnale ha la seguente espressione analitica:

$$P[pulse|R, d, \varphi] = \frac{e^{\alpha + \beta_1 \cdot R + \beta_2 \cdot d + \beta_3 \cdot \varphi}}{1 + e^{\alpha + \beta_1 \cdot R + \beta_2 \cdot d + \beta_3 \cdot \varphi}} \quad (1)$$

nella quale i coefficienti, per il caso in esame, valgono:

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.55278; \\ \beta_1 &= -0.0551; \\ \beta_2 &= -0.026669; \\ \beta_3 &= -0.0271. \end{aligned} \quad (2)$$

Il modello è valido, in linea di principio, nell'ambito dei limiti di Equazione (3)

$$\begin{cases} 5km \leq R \leq 30km \\ 0km \leq d \leq 20km \\ 0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (3)$$

In Figura 4 si riportano schematicamente le modalità di calcolo utilizzate in questo studio dei parametri geometrici a seconda della posizione relativa faglia-sito nel caso del terremoto studiato. La definizione delle zone si riferisce a quanto rappresentato in Figura 1.

Poiché nel database NGA i parametri geometrici precedentemente presentati sono calcolati per quasi tutte le registrazioni presenti, si suppone che essi comprendano anche le zone escluse dalla trattazione di Somerville et al. (1997) e anche il modello di Equazione (1) è stato applicato a tutto il piano orizzontale relativo alla rottura del terremoto de L'Aquila.

In fase di calcolo si è ritenuta trascurabile l'influenza delle differenze di quote tra i diversi punti.

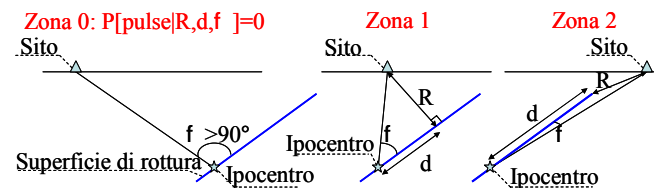


Figura 4. Schemi di calcolo dei parametri geometrici.

Le Figure 5 mostrano gli andamenti dei parametri geometrici e della funzione di probabilità per le zone near-source.

In Figura 6 sono invece mostrate le linee di isoprobabilità con passo pari 0.05 sul piano orizzontale. Si noti come le probabilità previste dal modello non sono particolarmente elevate e mai più alte di 0.5, questo perché le rotture di tipo normale o obliquo, su cui si basa il modello considerato, sono spesso complesse al punto che non è sempre identificabile chiaramente l'effetto direttivo; si veda Iervolino e Cornell (2008) per una discussione a tal proposito.

In Tabella 2 si riportano i valori dei parametri geometrici e della probabilità di osservare direttività per tutte le stazioni accelerometriche RAN con distanza dalla faglia entro circa 30 km.

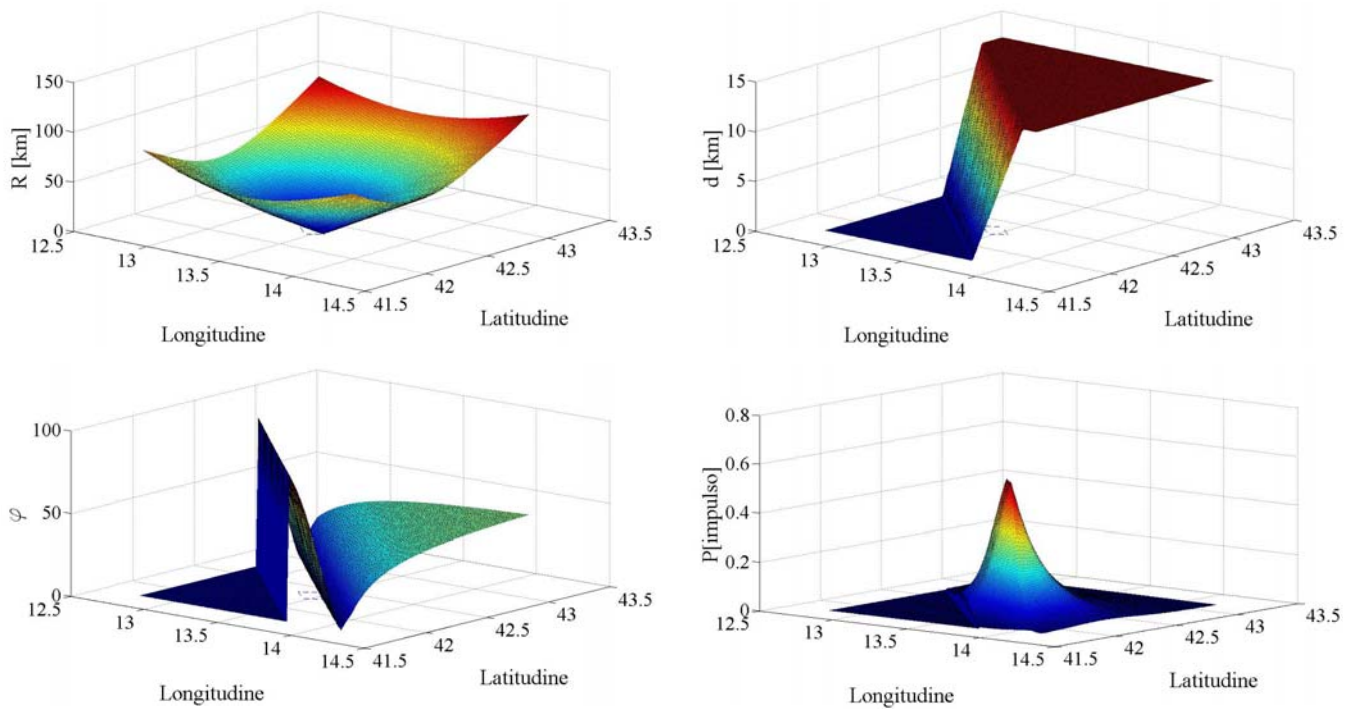


Figura 5. Partendo dalla sinistra in alto ed in senso antiorario: rappresentazione degli andamenti di R, d,  $\varphi$  e della probabilità di osservare segnali impulsivi.

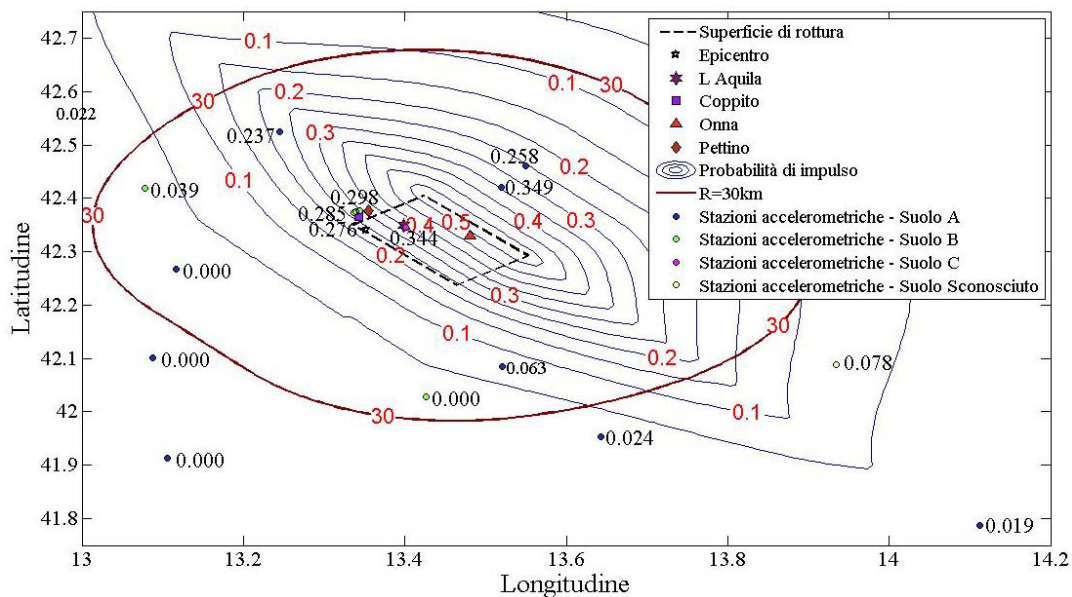


Figura 6. Distribuzione in pianta della probabilità di osservare segnali impulsivi e valori numerici calcolati per ogni stazione.

Tabella 2. Parametri geometrici e probabilità di direttività per le stazioni accelerometriche più vicine alla faglia.

Nome stazione	Long.	Lat.	R (km)	d (km)	$\varphi$ (deg)	P(pulse)
GX066	13.34	42.38	6.07	10.16	29.60	0.30
FA030	13.34	42.37	6.60	9.70	33.05	0.28
CU104	13.34	42.38	6.41	9.85	31.71	0.28
AM043	13.40	42.34	4.80	10.94	23.69	0.34
EF021	13.52	42.42	7.14	14.21	14.79	0.35
TK003	13.52	42.09	20.77	3.78	74.13	0.06

BI016	13.43	42.03	26.48	0.00	0.00	0.00
BY048	13.24	42.52	19.73	12.97	10.67	0.24
GE1463	13.55	42.46	11.89	14.21	21.31	0.26
BX007	13.12	42.27	23.47	0.00	0.00	0.00
DF006	13.08	42.42	25.37	1.29	85.47	0.04
BY003	13.09	42.10	35.62	0.00	0.00	0.00

## 5 IDENTIFICAZIONE DEI SEGNALI IMPULSIVI

Baker (2007) ha sviluppato un algoritmo per identificare i segnali accelerometrici di tipo

impulsivo e per riconoscere quelli che verosimilmente derivano da fenomeni di direttività. Tale procedura è stata tarata sulle componenti ruotate FN dei record dell'NGA.

I dati di partenza sono praticamente gli stessi utilizzati nella regressione logistica di Iervolino et al. (2008) precedentemente descritta e quindi i due modelli di analisi possono ritenersi consistenti tra loro. Inoltre, la tipologia di rottura e le caratteristiche dei suoli interessati (in prevalenza appartenenti alla categoria B e C) rendono anche le registrazioni del terremoto dell'Abruzzo compatibili con i dati dell'NGA.

La procedura utilizzata da Baker (2007) per l'identificazione dei segnali è di seguito riassunta nei suoi punti fondamentali:

1. La storia di velocità del segnale analizzato viene scomposta tramite wavelet. Il coefficiente moltiplicativo di ciascuna funzione wavelet rappresenta anche l'energia ad essa associata.
2. Del segnale scomposto viene identificato la funzione caratterizzata dal coefficiente moltiplicativo maggiore. Tale funzione viene sottratta al resto del segnale che viene nuovamente scomposto. La posizione nel tempo ed il periodo della funzione estratta identificano l'impulso. Per ottimizzare l'approssimazione dello stesso, dal segnale nuovamente scomposto si isola la funzione con periodo e posizione analoga a quella dell'impulso. Il procedimento di estrazione si ripete per nove volte.
3. L'algoritmo è tale da estrarre un impulso da qualsiasi segnale. Per definire quali di questi siano realmente impulsivi, il programma associa a ciascun record uno *score* compreso tra 0 ed 1. Baker suggerisce di considerare impulsivi i record con score superiore a 0.85 e non impulsivi i record con score minore dello 0.15. Classifica inoltre come segnali "ambigui" i record con score compreso tra i limiti appena indicati. Tali record rappresentano comunque una bassa percentuale di tutti i segnali dell' NGA analizzati.
4. Due ulteriori condizioni sono aggiunte per escludere segnali impulsivi non derivanti da fenomeni di direttività. La prima esclude tutti i segnali nei quali l'impulso non è nelle prime fasi del segnale e che più probabilmente derivano da effetti di sito o altro (per le quali l'indice "late" è posto pari ad 1), mentre la seconda

escluse i record con peak ground velocity (PGV) minore di 30 cm/sec. Quest'ultima serve ad escludere le registrazioni di terremoti di bassa magnitudo (trascurabili ai fini strutturali) e tutti i segnali molto distanti dalla faglia. Nel caso studiato la condizione sulla PGV è stata trascurata così come anche in Iervolino e Cornell (2008).

L'algoritmo di classificazione dei segnali, utilizzato anche nel presente lavoro, è implementato in ambiente Matlab ed è reperibile all'indirizzo <http://www.stanford.edu/~berkerjw/>. In Tabella 3 si riportano i risultati delle analisi effettuate su entrambe le componenti orizzontali ruotate in direzione normale e parallela allo strike dei segnali registrati da tutte le stazioni con distanza dalla faglia entro circa 30 km. I record ritenuti impulsivi dall'algoritmo sono riportati in grassetto.

Tabella 3. Risultati dell'algoritmo Matlab di Baker (2007); in colonna sono riportate nell'ordine: codice record, score, indice di "late", PGV, classificazione finale, periodo dell'impulso.

Id componente	Score	Late	PGV [cm/sec]	Pulse (0 No, 1 Si)	Tp [sec]
GX066_FN	0.70	0.00	37.63	0.00	0.53
<b>GX066_FP</b>	<b>0.85</b>	<b>0.00</b>	<b>31.41</b>	<b>1.00</b>	<b>1.06</b>
<b>FA030_FN</b>	<b>1.00</b>	<b>0.00</b>	<b>34.08</b>	<b>1.00</b>	<b>1.02</b>
FA030_FP	0.71	0.00	26.60	0.00	1.11
<b>CU104_FN</b>	<b>0.93</b>	<b>0.00</b>	<b>28.67</b>	<b>0.00</b>	<b>0.74</b>
CU104_FP	0.00	0.00	19.91	0.00	0.62
<b>AM043_FN</b>	<b>1.00</b>	<b>0.00</b>	<b>45.01</b>	<b>1.00</b>	<b>1.99</b>
AM043_FP	0.00	1.00	16.66	0.00	1.26
EF021_FN	0.72	0.00	10.91	0.00	3.13
EF021_FP	0.00	0.00	6.02	0.00	1.97
TK003_FN	0.05	1.00	5.48	0.00	5.17
TK003_FP	0.01	1.00	5.82	0.00	4.81
BI016_FN	0.97	1.00	13.06	0.00	1.88
BI016_FP	0.00	1.00	9.89	0.00	1.61
BY048_FN	0.01	1.00	4.08	0.00	2.60
BY048_FP	0.00	1.00	3.04	0.00	2.16
<b>GE1463_FN</b>	<b>0.95</b>	<b>0.00</b>	<b>3.66</b>	<b>0.00</b>	<b>4.03</b>
GE1463_FP	0.08	1.00	2.31	0.00	5.17
BX007_FN	0.00	1.00	2.12	0.00	4.03
BX007_FP	0.01	0.00	1.90	0.00	4.76
DF006_FN	0.00	0.00	2.25	0.00	0.95
DF006_FP	0.00	0.00	1.99	0.00	2.76
BY003_FN	0.00	1.00	2.24	0.00	4.82
BY003_FP	0.00	1.00	1.48	0.00	2.22

L'analisi dei risultati mostra che dei 24 record trattati, 5 di essi sono ritenuti impulsivi. Dei cinque solo uno è in direzione FP (GX066) mentre gli altri quattro sono in direzione FN. Inoltre le due componenti del segnale (GX066) hanno score molto simili, FN è ambiguo infatti, così come sono simili gli spettri di spostamento elastici ad essi associati (Figura 9).

Si evidenzia che la Tabella 3 mostra i risultati così come forniti dal programma nel quale è compreso anche il limite sulla PGV. L'aver trascurato questo limite influenza in modo significativo il solo record identificato come GE1463\_FN la cui PGV è significativamente minore del limite di 30 cm/sec assunto da Baker (2007). L'osservazione dello spettro di spostamenti elastico e della storia di velocità associati a tale segnale, hanno portato a classificare comunque come impulsiva questa registrazione.

A titolo di esempio, in Figura 7 si riportano, per due dei segnali impulsivi, le storie di velocità registrate, gli impulsi estratti dai segnali, i segnali residui (ovvero depurati dagli impulsi) e la storia di spostamento registrata. Il primo dei segnali di Figura 7 è stato registrato dalla stazione accelerometrica posta a L'Aquila. E' particolarmente interessante, oltre che per i danni che ha subito il sito, perché la posizione potrebbe essere favorevole in relazione a entrambe le direzioni di propagazione della rottura. Più avanti si mostrerà che gli spettri di spostamento registrati in questo punto sono notevolmente più severi di tutti gli altri (Figura 9) sebbene vada notato che la stazione sembra trovarsi su suolo C (Figura 2).

L'osservazione dei segnali di tutti i casi "ambigui" ha evidenziato che il segnale EF021 FN presenta caratteristiche tali da poter essere ritenuto impulsivo: gli spettri di spostamento elastici in Figura 9 sembrano rafforzare tale scelta. Nel seguito quindi anche questo segnale sarà trattato come impulsivo. I rimanenti segnali "ambigui" sono stati classificati non direttivi. Entrambe le scelte sono comunque arbitrarie.

Come accennato, alcuni autori hanno mostrato la dipendenza del periodo di impulso  $T_p$  dalla magnitudo dell'evento sismico (Somerville, 2003; Baker, 2007). Analizzando i dati dell'NGA utilizzati per il modello di Iervolino e Cornell (2008), è stata ricavata una relazione dello stesso tipo (Equazione 4) per cui la deviazione standard del residuo vale 0.59.

La Figura 8 mostra la distribuzione dei  $T_p$  rispetto alla regressione presentata.

$$E[\ln T_p] = -6.19 + 1.07 \cdot M_w \quad (4)$$

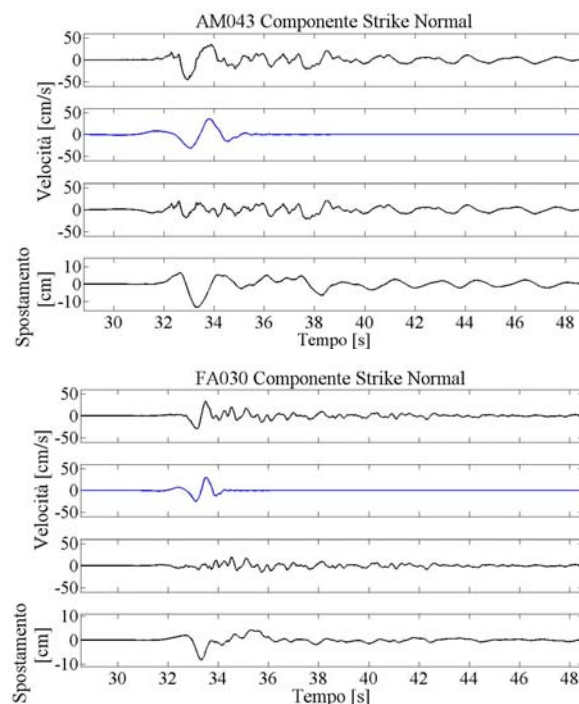


Figura 7. Rappresentazione grafica delle storie di velocità registrate, impulsi estratti, segnali residui e storie di spostamento registrati per le stazioni AM043 (sopra) ed FA030 (sotto).

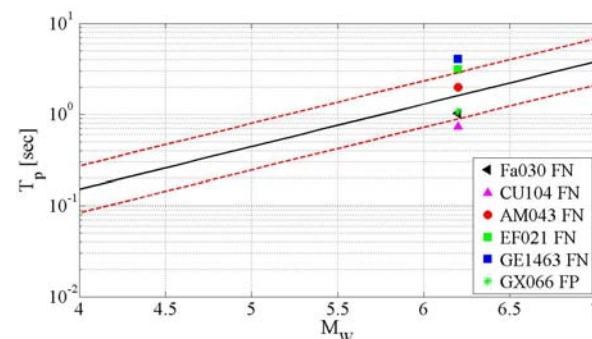


Figura 8. Confronto tra i periodi di impulso calcolati ed i valori attesi da analisi di regressione.

## 6 ANALISI DELLA DOMANDA SISMICA IN SPOSTAMENTO

Come accennato in precedenza, i fenomeni di direttività sono di interesse per l'ingegneria strutturale solo se ne deriva una domanda sismica particolarmente severa o comunque anomala rispetto a quanto prevedibile con gli strumenti tradizionali. Il fenomeno può essere evidenziato sia in campo lineare che non lineare.

In primo luogo si mostrano in Figura 9 gli spettri di spostamento lineari, con in ascissa il rapporto tra il periodo di oscillazione  $T$  e il periodo

dell'impulso  $T_p$  (estratto da ciascuna registrazione, Tabella 3) dei segnali impulsivi e delle componenti ad essi ortogonali. Tali spettri sono stati calcolati per  $T/T_p$  compreso tra 0.1 e 2.0 con passo di 0.025.

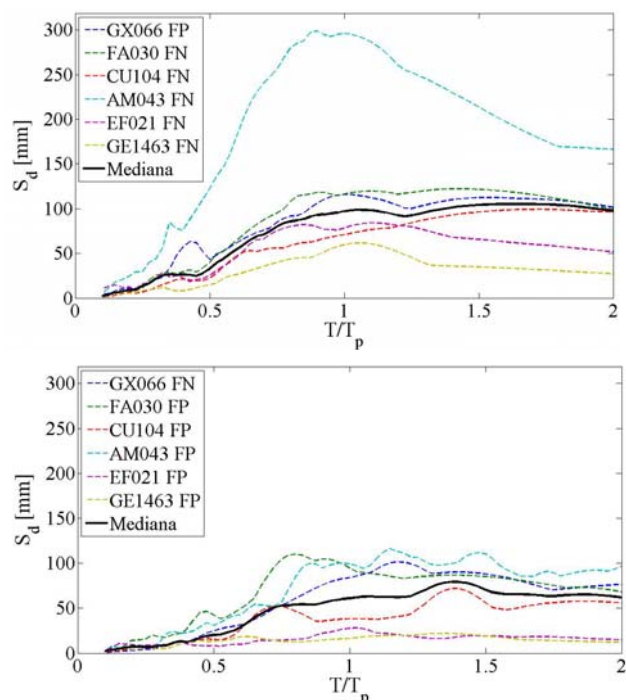


Figura 9. Spettri di spostamento elastici per i segnali impulsivi (sopra) e i segnali ad essi ortogonali (sotto).

Dalla figura risalta la differenza di domanda elastica tra le due componenti del segnale registrato della stazione de L'Aquila. Per questo motivo, si riportano anche gli spettri mediani, che aiutano a stimare in maniera più robusta la differenza tra gli spettri FN e FP rispetto a quelli medi. In generale dalla figura si evince che la componente normale alla rottura è anche quella strutturalmente più severa. Si nota, inoltre, che le due componenti del segnale GX066 sono particolarmente simili tra loro; questo è in accordo con gli score simili assegnati dal programma di analisi dei segnali sebbene non con la teoria che riguarda il fenomeno che vuole una netta differenza di energia delle due componenti. Al contrario, le due componenti del segnale EF021 sono significativamente diverse tra loro il che ha supportato la scelta degli autori di considerare impulsiva la componente FN dello stesso segnale.

Per studiare gli effetti della direttività anche in campo non lineare, si sono costruiti gli spettri di spostamento di un sistema ad un grado di libertà (SDoF) con massa unitaria e legame costitutivo bilineare caratterizzato dal 3% di incrudimento e da fattori di riduzione della resistenza costanti ( $R_S = F_{el}/F_y$ ) e pari a 2, 4, 6, 8 e 10. Tali spettri sono

stati calcolati in funzione del rapporto  $T/T_p$  per lo stesso intervallo e lo stesso passo utilizzato per gli spettri elastici.

In Figura 10 sono riportati gli spettri mediani per il solo valore di  $R_S = 4$ . Gli stessi diagrammi, per  $R_S$  diversi, presentano comunque andamenti compatibili con quello mostrato. La Figura 10 conferma, anche in campo non lineare, che la richiesta di spostamento delle componenti identificate come impulsive è maggiore di quella delle componenti non impulsive.

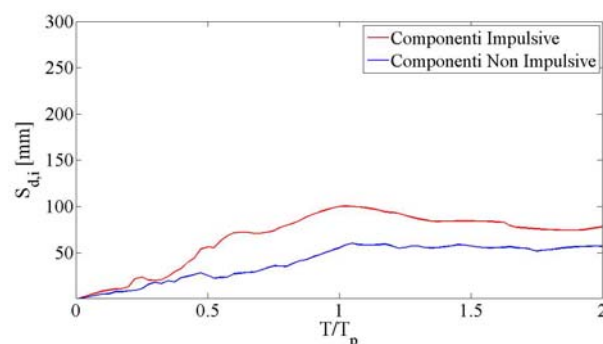


Figura 10. Spettri mediani  $R_S = 4$  calcolati per le componenti impulsive dei segnali impulsivi e le componenti ad esse ortogonali.

In Figura 11 sono riportate le medie dei logaritmi dei rapporti degli spettri inelastici di spostamento (per  $R_S = 4$ ) rispetto agli spettri di spostamento elastici. Tali rapporti sono calcolati oltre che per i due gruppi della figura precedente (FN e FP delle stazioni identificate come direttive, linee continue) anche per le componenti FN (linea tratteggiata) delle stazioni in cui non si sono individuati segnali di tipo impulsivo ovvero per un campione di record, in linea di principio, ordinari. Quest'ultime sono 5 poiché è stato eliminato il segnale BI016 classificato come impulsivo anche se non a causa di direttività ( $late = 1$ ), ma probabilmente per effetti di sito.

La Figura 11 evidenzia che i segnali impulsivi presentano, generalmente, un andamento delle richieste di spostamento inelastiche, rapportate a quelle elastiche, maggiori dei segnali delle stazioni non identificate come impulsive. In particolare si noti il picco a  $T/T_p = 0.5$  che indica, in accordo con altre osservazioni precedenti, l'incremento di richieste inelastiche per strutture che hanno un periodo fondamentale circa la metà di quello dell'impulso (Tothong e Cornell, 2006).

Tuttavia, è da notare che le componenti ortogonali a quelle identificate come impulsive hanno un andamento simile a queste pur avendo score molto più basso se non nullo (Tabella 3).



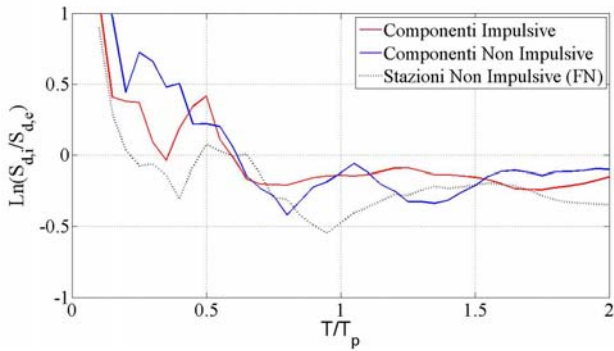


Figura 11. Medie dei logaritmi rapporti spettrali  $R_s = 4$  calcolati per le componenti impulsive dei segnali impulsivi e le componenti ad esse ortogonali.

## 7 SEGNALI NON RUOTATI

In accordo con tutti i modelli utilizzati, sono stati riportati i soli risultati delle analisi eseguite sulle componenti orizzontali ruotate delle registrazioni in accordo con la Figura 3. Analoghe analisi delle componenti non ruotate hanno evidenziato due aspetti che sembrano indicare che gli effetti di direttività, se presenti, vanno studiati ruotando opportunamente le componenti<sup>2</sup>.

1. La direzione FN è in media quella in cui si registrano le domande simiche maggiori rispetto ad entrambe le componenti non ruotate. Al contrario la direzione FP identifica le domande sismiche minori. Questo è sinteticamente mostrato dalla Figura 12 nella quale sono riportate le medie dei logaritmi dei rapporti tra gli spettri elastici ruotati e non (registrati quindi in direzione Nord-Sud ed Est-Ovest). E' inoltre visibilmente verificabile per 7 delle 12 stazioni considerate, sebbene per brevità tali risultati non si siano riportati.
2. L'analisi dei segnali non ruotati permetteva di identificare fenomeni di direttività che però risultavano, in modo apparentemente casuale, sia in direzione E-W che in direzione N-S. In particolare si sono classificati come probabilmente impulsivi (score maggiore di 0.85) 4 segnali in direzione E-W e 3 in direzione N-S. In un caso (TK003) entrambe le componenti sono state classificate come impulsive.

<sup>2</sup> In questo caso si è ruotato in direzione normale e parallela allo strike (Figura 3), tuttavia una rottura che si è propagata in più direzioni come quella occorsa potrebbe richiedere un approfondimento delle direzioni in cui ci si aspetta siano massimizzati gli effetti di direttività

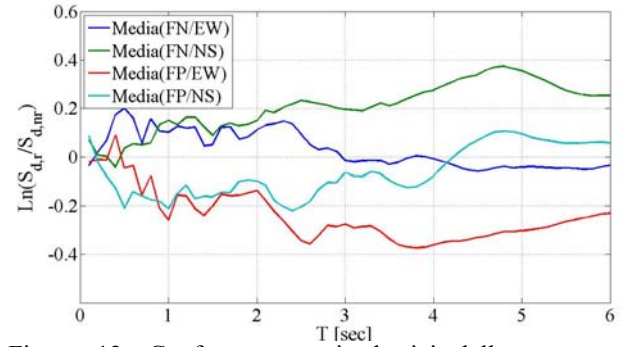


Figura 12. Confronto spettri elastici delle componenti ruotate e non ruotate.

## 8 L'ANOMALIA NELLA COMPONENTE VERTICALE E LA DIRETTIVITÀ

In accordo alla Figura 3 sembrerebbe che nei terremoti *dip-slip* una parte degli effetti della direttività possa manifestarsi anche nella componente verticale, sebbene tale aspetto, almeno a conoscenza degli autori, non mai sia stato esplicitamente investigato. Tuttavia, le componenti verticali delle registrazioni in cui sono stati identificati dei segnali impulsivi (sulle componenti ruotate) presentano ordinate spettrali apparentemente anomali rispetto alle componenti verticali registrate dalle stazioni non soggette a direttività. Per poter confrontare tali registrazioni indipendentemente dalle rispettive distanze dalla faglia, si è scelto di calcolare gli scostamenti dei logaritmi dei valori registrati di accelerazione ( $S_{a,registrate}$ ) rispetto ai valori calcolati con la media della legge di attenuazione di Sabetta e Pugliese (1996),  $S_{a,S\&P}$ . Tali scostamenti sono quantificati tramite il valore di  $\varepsilon$ , la cui espressione è riportata di seguito:

$$\varepsilon = \frac{\log(S_{a,registrate}) - \log(S_{a,S\&P})}{\sigma_{S\&P}} \quad (5)$$

La Figura 13 mostra i valori ottenuti in media per tutte le stazioni identificate come impulsive e non. Le medie sono quindi calcolate per 6 segnali nel primo caso e per 5 nel secondo. Si è inoltre utilizzata la legge di attenuazione sia in funzione della distanza dalla faglia che in funzione della distanza epicentrale.

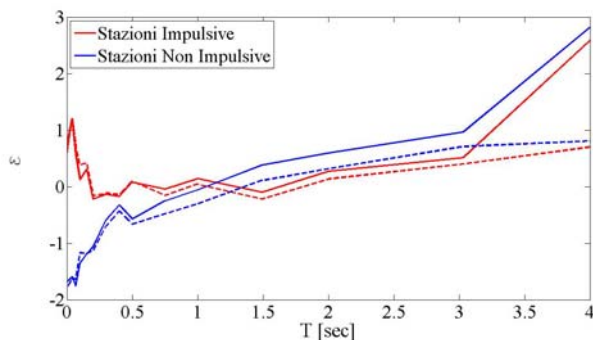


Figura 13.  $\epsilon$  medie calcolate per le stazioni impulsive e non impulsive in funzione della distanza dalla faglia (linee continue) e della distanza epicentrale (linee tratteggiate).

I segnali registrati dalle stazioni identificate come impulsive presentano valori delle ordinate spettrali mediamente superiori a quelli attesi ( $\epsilon$  positive) alle alte frequenze. Somerville *et al.* (1997), però, non si aspettano effetti di direttività in tale range di periodi, come invece altri autori (e.g., Campbell 1987). Inoltre, gli spettri derivanti da stazioni non identificate come impulsive sono ben inferiori ai valori attesi ad alte frequenze. Per questo l'attribuzione alla direttività della anomalia delle componenti verticali delle stazioni identificate come impulsive non è immediata.

## 9 CONCLUSIONI

Lo studio presentato rappresenta un primo tentativo di investigare la presenza di effetti di interesse strutturale legati a fenomeni di direttività durante il mainshock della recente sequenza abruzzese. Le analisi fanno riferimento a recenti modelli e algoritmi sviluppati ai fini della previsione e dell'identificazione e di impulsi di velocità nei segnali ortogonali alla rottura.

Attraverso un modello che prevede gli effetti di direttività nei terremoti non strike-slip, sulla base di parametri geometrici relativi alla configurazione sito-sorgente, è stato possibile individuare preliminarmente le zone in cui con maggiore probabilità si sarebbero trovati segnali direttivi. Successivamente, attraverso un'apposita procedura di decomposizione delle registrazioni entro circa 30km dalla rottura, si sono identificate le stazioni che sembrano mostrare caratteristiche direttive. La posizione di quest'ultime è risultata, in generale, coerente con la mappa di probabilità precedentemente costruita. Aver eseguito tutte le analisi sulle componenti normali e parallele allo strike, ha permesso di verificare che gli impulsi trovati sono principalmente in direzione normale come atteso se essi fossero dovuti alla direttività.

Attraverso semplici analisi su sistemi SDOF, si è evidenziato che, alle registrazioni di tipo direttive è associata una domanda sismica superiore a quella associata ai segnali ortogonali ad essi. Tuttavia, le componenti non impulsive delle stazioni indicate come impulsive mostrano un andamento dei rapporti tra domanda inelastica ed elastica simile a quelli in cui l'impulso sarebbe presente.

In conclusione, i risultati sembrano indicare che la domanda sismica sulle strutture possa aver in qualche misura risentito della direttività, tuttavia le analisi condotte sono da ritenersi preliminari e necessitano di approfondimenti atti a meglio *isolare* e quantificare l'effetto sulla base, ad esempio, di una più dettagliata caratterizzazione della cinematica della rottura e della sua geometria.

## BIBLIOGRAFIA

- Baker, J. W. (2007). Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions Using Wavelet Analysis, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 97(5), 1486-1501.
- Bazzurro P., Cornell, C. A., (2002). Disaggregation of Seismic Hazard, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 89(2), 501-520.
- Campbell, K. W. (1987) Predicting Strong Ground Motion in Utah, in *Evaluation of Regional and Urban Earthquake Hazards*, UG Geological Survey, Open File Report 87-585, 2, L1-L90.
- Chioccarelli, E., De Luca, F., Iervolino, I. (2009). *Preliminary Study of L'Aquila Earthquake Ground Motion Records*, disponibile a <http://www.reluis.it>.
- Kramer, S. L., *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, 1996.
- Iervolino, I., Cornell, C. A. (2008). Probability of Occurrence of Velocity Pulses in Near-Source Ground Motion, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 98(5), 2262-2277.
- Reiter, L., (1990). *Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insights*, Columbia University Press.
- Somerville, P. G. (2003). Magnitude Scaling of the Near Fault Rupture Directivity Pulse, in *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 137, 201-212.
- Somerville, P. G. (2005). Engineering Characterization of Near-Fault Ground Motions, *Proceeding of 2005 NZSEE Conference*, Wairakei, NZ.
- 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, *Seism. Res. Lett.* 68(1), 199-122.
- Tothong, P., C. A. Cornell (2006). *Probabilistic Seismic Demand Analysis Using Advanced Ground Motion Intensity Measures, Attenuation Relationships, and Near Fault Effect*, PEER Report 2006/11, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California.
- Verderame, G. M., Iervolino, I., Ricci, P. (2009). *Report on the Damages on Buildings Following the Seismic Event of 6th of April*, disponibile a <http://www.reluis.it>.