



L'AZIONE SISMICA REGISTRATA DURANTE IL MAINSHOCK DEL 6 APRILE 2009 A L'AQUILA E LE PRESCRIZIONI DEL DM 14/01/2008 V.1



Iunio Iervolino, Flavia de Luca, Eugenio Chioccarelli, Mauro Dolce.
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi di Napoli Federico II

iunio.iervolino@unina.it; flavia.deluca@unina.it; eugenio.chioccarelli@unina.it; mauro.dolce@protezionecivile.it

Introduzione

Nel lavoro qui di seguito si propone un primo confronto tra la valutazione della pericolosità sismica secondo l'attuale normativa vigente in Italia (DM 14/01/2008; CS.LL.PP., 2008) e gli effetti registrati in termini di segnali accelerometrici durante il recente terremoto aquilano dalla Rete Accelerometrica Nazionale (RAN) del Dipartimento della Protezione Civile. Il confronto è basato su una serie di elaborazioni svolte sui dati accelerometrici, che fissano l'attenzione su alcuni aspetti del complesso problema della definizione della pericolosità sismica di un sito. Pur necessitando una più meditata valutazione complessiva del problema, si ritiene utile mettere a disposizione della comunità tecnico-scientifica, i risultati trovati e le considerazioni che ne conseguono.

Caratterizzazione dei dati accelerometrici disponibili

Nelle tabelle che seguono si riportano i dati relativi alla collocazione delle stazioni con distanza della faglia inferiore ai 30 km (Tabella 1). La seconda tabella (Tabella 2) riporta i valori di picco di accelerazione, velocità e spostamento calcolati sui segnali registrati durante il mainshock del 6 Aprile 2009 dopo un'operazione di filtraggio e correzione della "baseline" (Chioccarelli et al., 2009). La classificazione delle stazioni così come riportata in Tabella 1 riprende i dati aggiornati al 21 maggio 2001 sulla classificazione delle stazioni secondo i profili di suolo definiti dall'Eurocodice 8 (Ameri et al, 2009). Va, peraltro, evidenziato come solo la stazione AQV sia stata caratterizzata in funzione della V_{s30} , mentre le altre stazioni, le cui tipologie di suolo sono contrassegnate da un asterisco (*), sono caratterizzate in base alla classificazione da carta geologica. In Figura 1a sono localizzate le tredici stazioni considerate in questo studio insieme con la localizzazione dell'epicentro, della superficie di rottura e di alcuni centri importanti per quanto riguarda il danneggiamento osservato (L'Aquila, Onna, Coppito e Pettino). In Figura 1b si riportano i valori di intensità macrosismica registrati in più di 300 località nell'area colpita (dati QUEST – Quick Earthquake Survey Team, <http://www.ingv.it/>), raggruppati in intervalli di 10km di distanza epicentrale e mediati in ciascun intervallo (questo spiega i valori non interi di intensità media). In cui si nota un brusco calo dell'intensità nel passaggio oltre i 20 km di distanza epicentrale.

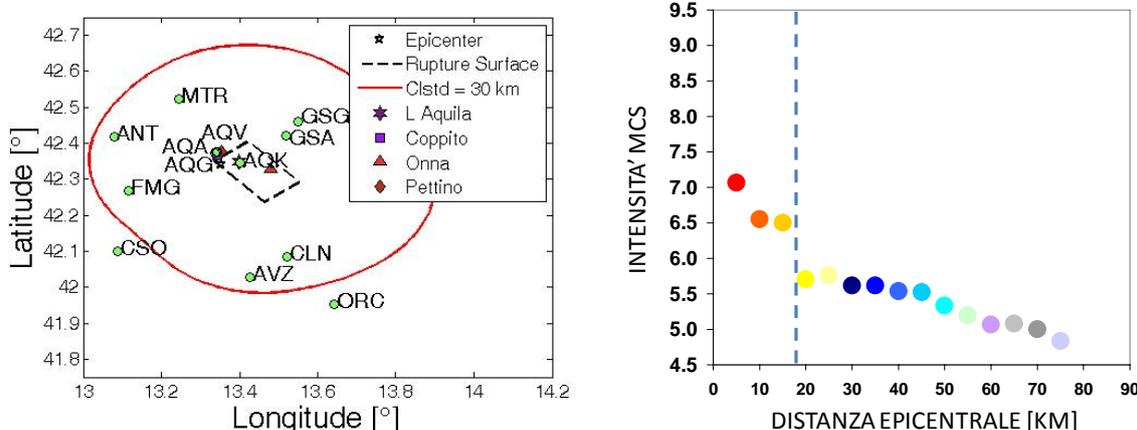


Figura 1. Mappa di localizzazione di siti, stazioni ed epicentro (sinistra), attenuazione della intensità macrosismica con la distanza (destra).

I valori dell'intensità di Arias (I_A), dell'indice di Cosenza e Manfredi (I_D) nonché della durata significativa (S_d) delle tre componenti registrate di ciascun segnale sono riportati nella Tabella 3. La componente x è orientata in direzione Est – Ovest, la componente y in direzione Nord – Sud, la componente z in direzione Up – Down.

Record Identifier	Station Id	Latitude	Longitude	Station Na	Altitude (m)	Soil Type
GX066	AQV	42.38	13.34	L'AQUILA - V. ATERNO - CENTRO VALLE	692	B
FA030	AQG	42.37	13.34	L'AQUILA - V. ATERNO - COLLE GRILLI	721	A*
CU104	AQA	42.38	13.34	L'AQUILA - V. ATERNO - F. ATERNO	693	B*
AM043	AQK	42.34	13.40	L'AQUILA - V. ATERNO - AQUIL PARK IN	726	B*
EF021	GSA	42.42	13.52	GRAN SASSO (LAB. INFN ASSERGI)	1,062	A*
TK003	CLN	42.09	13.52	CELANO	803	A*
BI016	AVZ	42.03	13.43	AVEZZANO	746	B*
CR008	ORC	41.95	13.64	ORTUCCHIO (NUOVA)	732	A*
BY048	MTR	42.52	13.24	MONTEREALE	975	A*
GE1463	GSG	42.46	13.55	GRAN SASSO (LAB. INFN GALLERIA)	1,200	A*
BX007	FMG	42.27	13.12	FIAMIGNANO	1,071	A*
DF006	ANT	42.42	13.08	ANTRODOCO	568	B*
BY003	CSO	42.10	13.08	CARSOLI	653	A*

Tabella 1. Localizzazione e tipologia di suolo delle stazioni.

Record Identifier	Station Id	PGA _x	PGV _x	PGD _x	PGA _y	PGV _y	PGD _y	PGA _z	PGV _z	PGD _z	Epicentral Distance
		[cm/s ²]	[cm/s]	[cm]	[cm/s ²]	[cm/s]	[cm]	[cm/s ²]	[cm/s]	[cm]	
GX066	AQV	613.8	36.7	8.4	586.2	40.5	4.1	411.7	13.4	2.5	4.8
FA030	AQG	408.2	33.6	7.9	426.1	35.9	3.9	211.4	9.1	1.9	4.3
CU104	AQA	386.8	30.5	6.4	442.0	24.5	3.9	373.2	9.4	1.9	5.8
AM043	AQK	335.5	30.3	7.8	333.6	38.5	11.8	343.8	15.0	4.9	5.6
EF021	GSA	150.6	9.7	3.0	146.6	7.4	2.2	110.3	5.5	1.5	18
TK003	CLN	79.2	4.6	2.6	87.1	6.7	1.9	44.1	5.7	1.9	31.6
BI016	AVZ	60.6	10.5	4.6	69.6	10.6	4.4	25.7	3.6	1.3	34.9
CR008	ORC	67.1	6.1	1.3	39.9	3.7	0.9	29.7	3.8	0.6	49.4
BY048	MTR	42.4	3.3	1.0	59.6	3.1	0.7	22.9	3.2	0.8	22.4
GE1463	GSG	20.1	3.5	1.6	29.2	3.1	1.8	19.4	3.0	1.8	22.6
BX007	FMG	23.7	2.5	1.2	26.0	1.7	0.6	18.5	1.5	0.4	19.3
DF006	ANT	19.6	1.9	0.4	25.8	2.2	0.5	11.5	1.1	0.2	23.1
BY003	CSO	17.3	2.2	1.0	17.1	1.4	0.6	14.8	2.0	0.7	33

Tabella 2. Valori di PGA, PGV e PGD in base alle componenti registrate e le stazioni.

Record Identifier	Station Id	I _{A,x}	I _{D,x}	S _{d,x}	I _{A,y}	I _{D,y}	S _{d,y}	I _{A,z}	I _{D,z}	S _{d,z}	Epicentral Distance
		[cm/s]	[/]	[s]	[cm/s]	[/]	[s]	[cm/s]	[/]	[s]	
GX066	AQV	283.0	7.8	7.6	199.7	5.3	7.7	89.6	10.1	6.1	4.8
FA030	AQG	129.6	5.9	8.0	129.8	5.3	8.5	31.4	10.2	8.3	4.3
CU104	AQA	158.9	8.4	7.4	172.6	10.0	7.6	52.9	9.4	6.7	5.8
AM043	AQK	100.3	6.2	12.2	119.8	5.8	11.3	111.4	13.5	10.5	5.6
EF021	GSA	40.0	17.1	8.4	43.7	25.1	8.8	13.5	14.0	9.5	18
TK003	CLN	3.7	6.3	6.6	3.9	4.1	7.7	1.7	4.2	8.3	31.6
BI016	AVZ	7.8	7.7	20.9	9.8	8.3	18.3	2.4	16.3	17.9	34.9
CR008	ORC	4.1	6.2	9.8	2.5	10.8	13.7	0.9	4.8	13.3	49.4
BY048	MTR	3.4	15.1	15.1	5.8	19.7	11.4	1.3	11.3	19.4	22.4
GE1463	GSG	0.6	5.5	11.6	0.9	6.2	9.5	0.6	6.5	14.4	22.6
BX007	FMG	1.2	12.5	18.6	1.0	14.7	23.0	0.8	18.3	21.6	19.3
DF006	ANT	0.9	14.2	24.6	1.8	19.1	21.2	0.3	15.3	22.4	23.1
BY003	CSO	0.8	13.1	24.4	0.6	14.5	24.6	0.5	10.3	20.6	33

Tabella 3. Valori di I_A, I_D ed S_d per le diverse componenti e ciascuna stazione.

Data l'evidente differenza riscontrata tra i segnali registrati a meno di 6 km dall'epicentro e gli altri, registrati in ogni caso entro circa 30 km dalla faglia, le rappresentazioni e i confronti rispetto agli spettri di norma sono stati valutati separatamente allo scopo di mostrare come le registrazioni più vicine siano affette da fenomeni di campo di vicino (*near-source*), si veda a tal proposito il seguito di questo documento. Allo stesso modo, data la poca affidabilità della classificazione su base di carta geologica, si riportano gli spettri di normativa valutati su suoli A e C (secondo la normativa italiana) allo scopo di simulare la minima e la massima amplificazione di suolo prevista in base alle tipologie di suolo più frequenti ritrovate nella zona. Oltre al confronto in termini di spettri di accelerazione si riportano i confronti in termini di velocità e spostamento nonché in ultimo in termini di intensità di Housner.

Confronto in funzione della distanza epicentrale

Dall'analisi delle forme spettrali dei segnali selezionati, si individuano due gruppi: quelli registrati nelle vicinanze dell'epicentro, i.e. entro 15 km, e quelli registrati tra 15 e 30 km. Si propone, dunque, il confronto degli spettri elastici ottenuti dai segnali con gli spettri di norma per i periodi di ritorno T_R 475, 975 e 2475 anni per le due tipologie di suolo A e C. Per la componente orizzontale si è valutata la media geometrica degli spettri di accelerazione ottenuti dalle due componenti. In Figura 2 sono riportate le mappe di localizzazione in funzione della divisione in due gruppi.

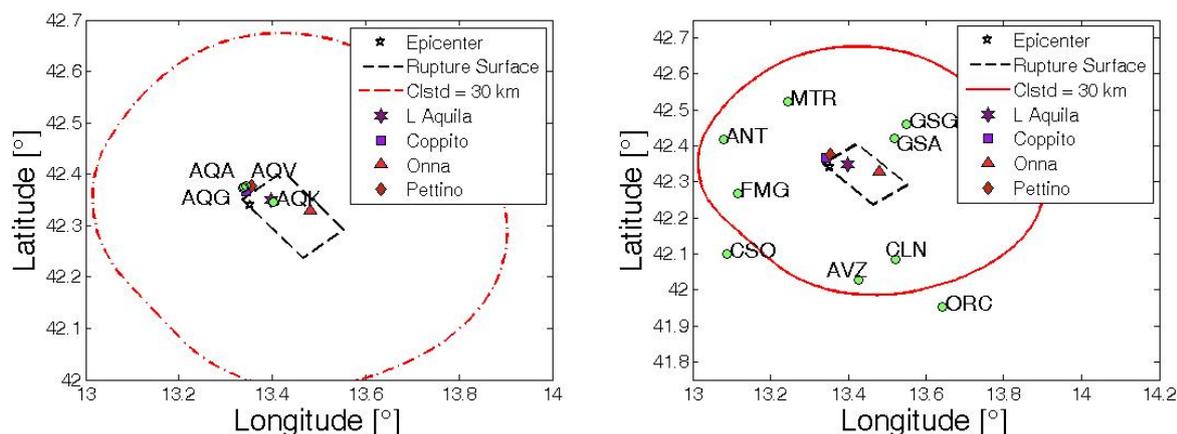


Figura 2. Localizzazione delle stazioni entro i 15 km (sinistra) e oltre i 15 km (destra).

In Figura 3 è proposto il primo confronto tra i segnali registrati entro i 15 km e quelli oltre i 15 km rispetto agli spettri di norma in termini di accelerazione, a seguire nelle Figure 4 e 5 si ripropongono gli stessi confronti in termini di velocità ed accelerazione, in questo caso si è proposta la media geometrica delle ordinate spettrali ricavate dalle due componenti orizzontali. Nelle Figure da 6 a 8 si ripropone l'analogo confronto per la componente verticale che non è affetta, secondo normativa dall'amplificazione stratigrafica in funzione della tipologia di suolo. Gli spettri di "normativa" per velocità e spostamento sono stati ricavati come se gli spettri in accelerazione fossero di pseudo-accelerazione. Nelle Figure 9 e 10 si riportano, invece, le intensità di Housner H_{10} e H_{50} valutate dagli spettri di velocità secondo la normativa per i suoli A e C in funzione di tutti i periodi di ritorno tabellati nell'allegato A al DM 14/01/2008 confrontando tali valori con quelli valutati per la media geometrica delle componenti orizzontali dei segnali registrati entro i 15 km. H_{10} rappresenta l'integrale dello spettro di pseudo-velocità tra i valori 0.1 – 0.5 secondi. H_{50} rappresenta l'integrale dello spettro di pseudo-velocità tra i valori 0.2 – 2.0 secondi.

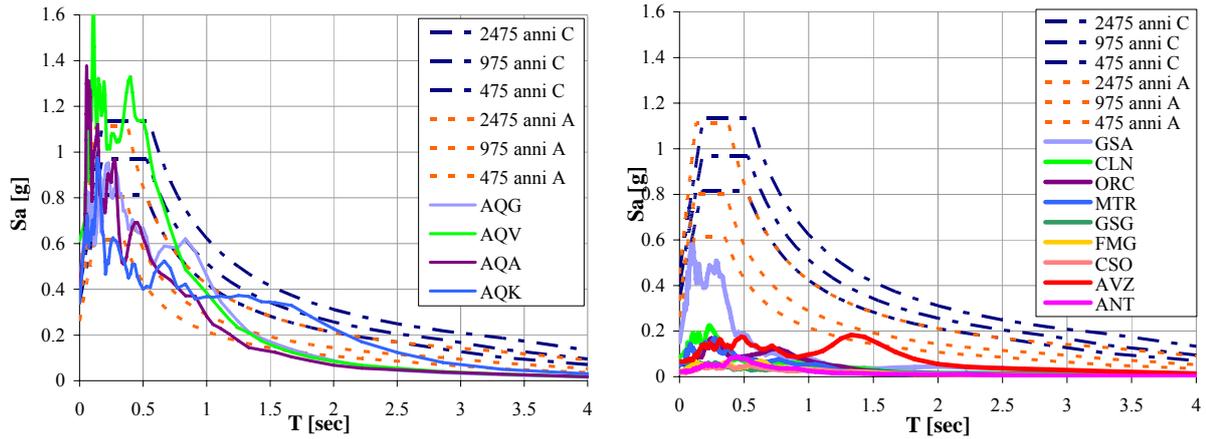


Figura 3. Confronto degli spettri di accelerazione della media geometrica delle componenti orizzontali dei segnali registrati entro i 15 km (sinistra) e oltre (destra) con le forme spettrali di norma per suolo A e C.

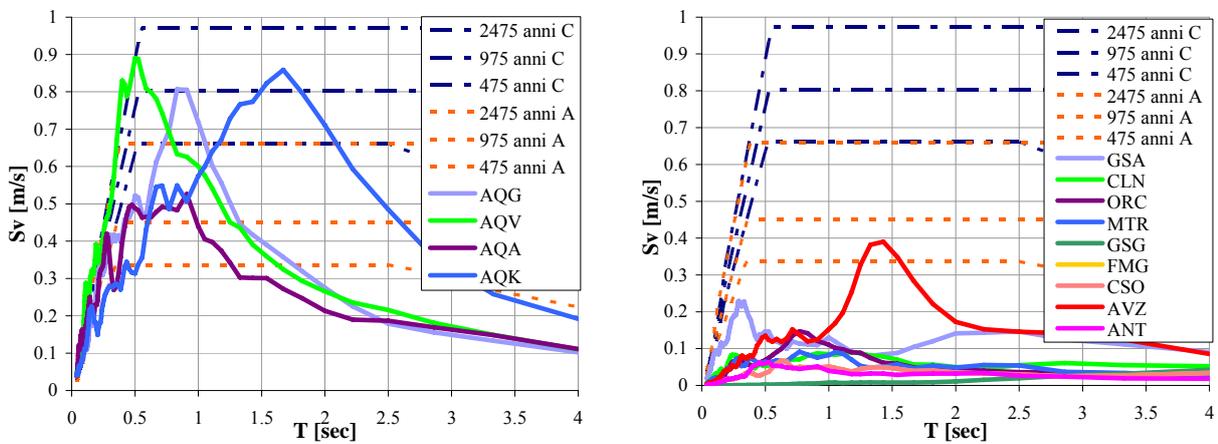


Figura 4. Confronto degli spettri di velocità della media geometrica delle componenti orizzontali dei segnali registrati entro i 15 km (sinistra) e oltre (destra) con le forme spettrali di norma per suolo A e C.

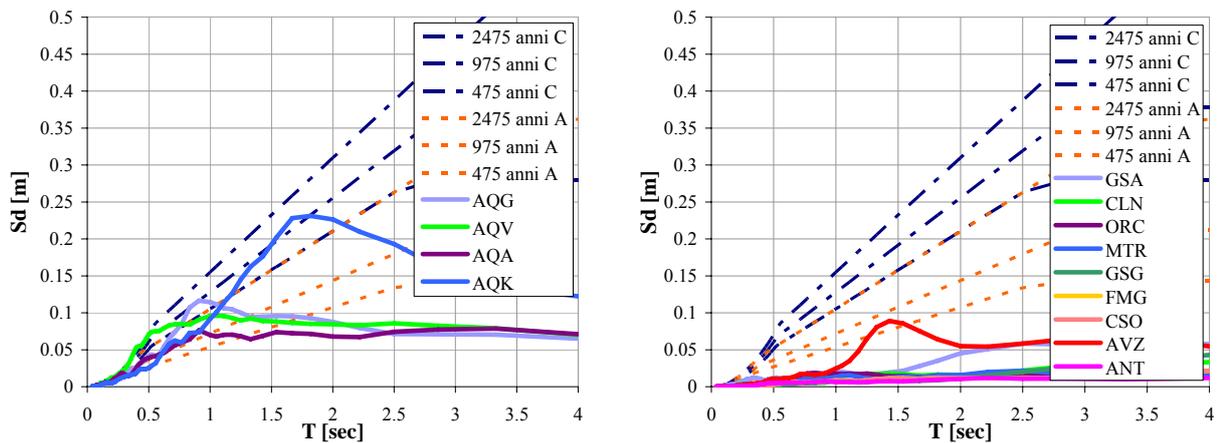


Figura 5. Confronto degli spettri di spostamento della media geometrica delle componenti orizzontali dei segnali registrati entro i 15 km (sinistra) e oltre (destra) con le forme spettrali di norma per suolo A e C.

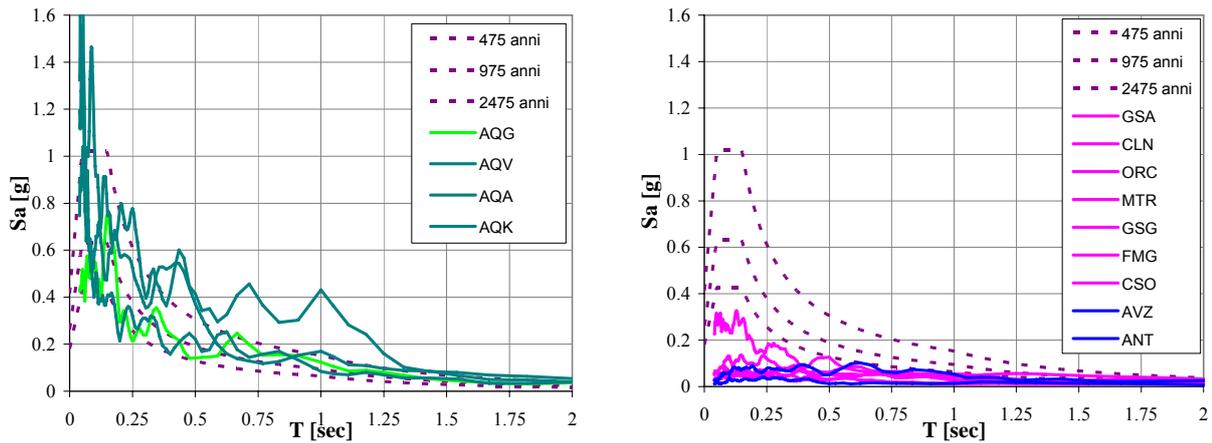


Figura 6. Confronto degli spettri di accelerazione della componente verticale dei segnali registrati entro i 15 km (sinistra) e oltre (destra) con le forme spettrali di norma per suolo A e C.

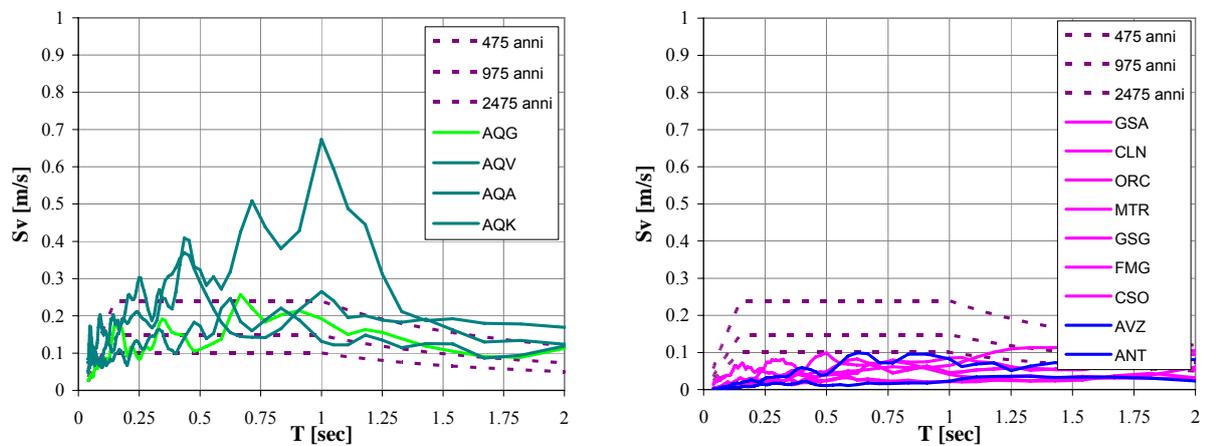


Figura 7. Confronto degli spettri di velocità della componente verticale dei segnali registrati entro i 15 km (sinistra) e oltre (destra) con le forme spettrali di norma per suolo A e C.

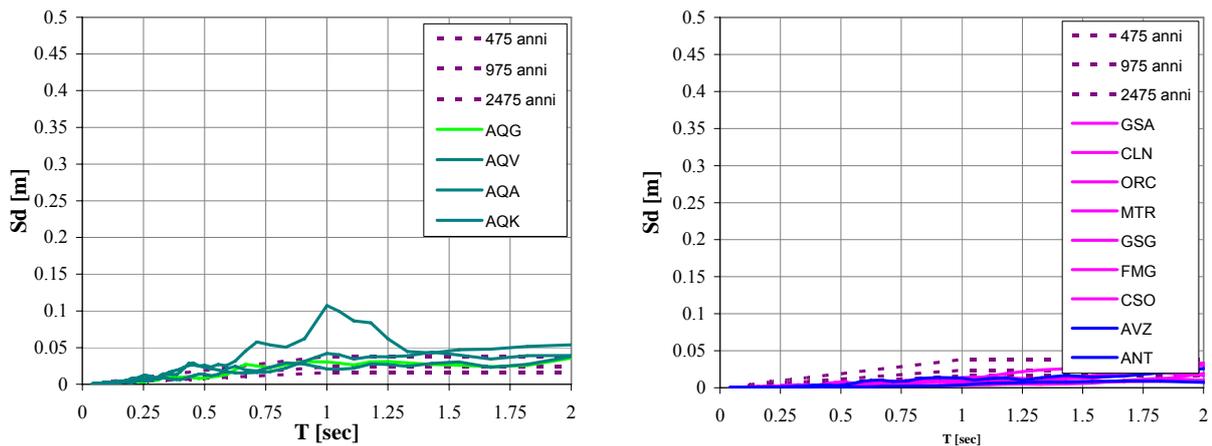


Figura 8. Confronto degli spettri di spostamento della componente verticale dei segnali registrati entro i 15 km (sinistra) e oltre (destra) con le forme spettrali di norma per suolo A e C.

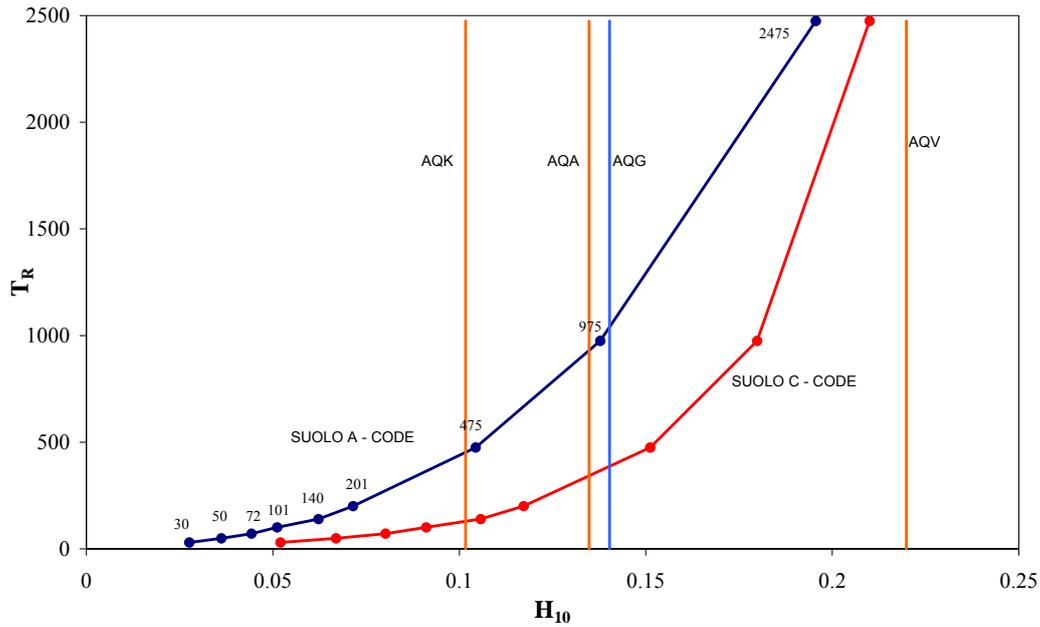


Figura 9. H_{10} valutata per i diversi periodi di ritorno e variabilità di quest'ultima per suoli A e C confrontata con H_{10} della media geometrica delle componenti orizzontali dei segnali registrati entro i 15 km.

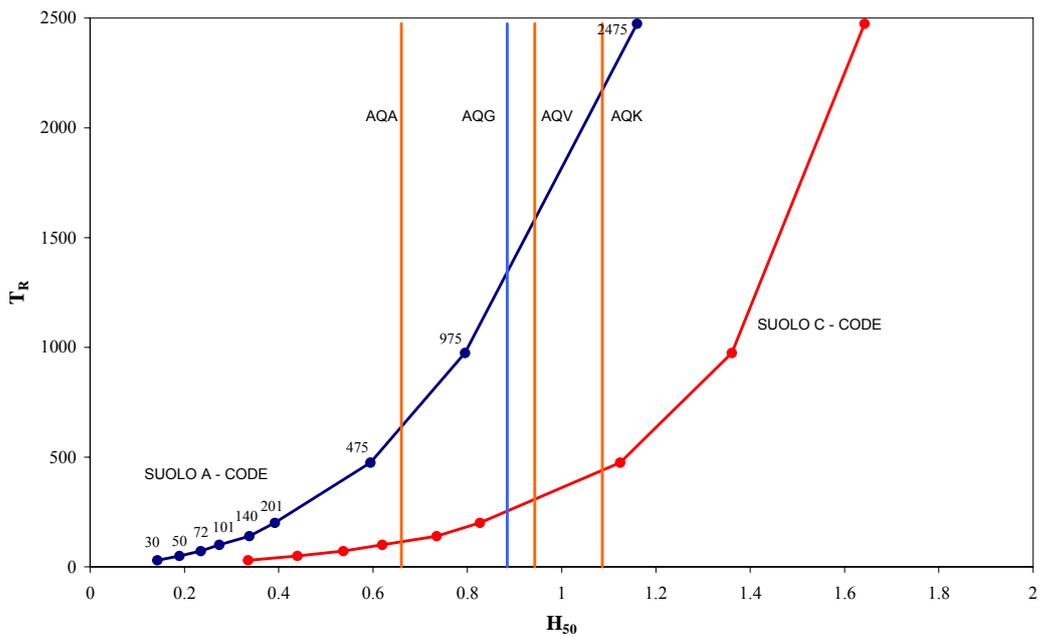


Figura 10. H_{50} valutata per i diversi periodi di ritorno e variabilità di quest'ultima per suoli A e C confrontata con H_{50} della media geometrica delle componenti orizzontali dei segnali registrati entro i 15 km.

Confronto con la variabilità degli spettri di norma (16°, 50° e 84° percentile)

I segnali più vicini all'epicentro sono inoltre confrontati con gli spettri su suolo rigido (A) valutati al 16°, 50° e 84° percentile per i periodi di ritorno valutati nel progetto S1 INGV, inoltre calcolando i coefficienti di amplificazione stratigrafica per suolo C (S_s) per i diversi periodi di ritorno e per ciascun percentile considerato si riportano gli stessi spettri UHS tenendo conto dell'amplificazione di sito. I periodi di ritorno selezionati sono 475 anni, 1000 anni e 2500 anni confrontati separatamente con gli spettri dei quattro segnali registrati entro i 15 km e precisamente nelle stazioni AQG, AQV, AQA, AQK. Le Figure 11, 12 e 13 riportano gli spettri di accelerazione confrontati rispettivamente con i periodi di ritorno 475, 1000 e 2500 per tre percentili (16°, 50°, 84°).

84°) e le due categorie di suolo A e C. Le Figure 14, 15 e 16 riportano gli spettri di velocità confrontati rispettivamente con i periodi di ritorno 475, 1000 e 2500 per i tre percentili e le due categorie di suolo A e C. Le Figure 17, 18 e 19 riportano gli spettri di spostamento confrontati rispettivamente con i periodi di ritorno 475, 1000 e 2500 per i tre percentili e le due categorie di suolo A e C. Dai grafici relativi al periodo di ritorno 2500 anni (Figure 13, 16 e 19) si nota la piccola differenza tra i valori calcolati per suolo C e quelli calcolati su roccia (A), il fattore S_s infatti, all'aumento di a_g tende all'unità così come mostrato dall'equazione 1.

$$1.0 \leq 1.7 - 0.6 \cdot \frac{a_g}{g} \cdot F_0 \leq 1.5 \quad (1)$$

In Figura 20 e 21 sono valutati i valori dell'intensità di Housner H_{10} e H_{50} sugli spettri di velocità ad hazard uniforme (UHS) tenendo conto dell'amplificazione di suolo (suoli A e C) e valutando tali valori per i diversi percentili (16°, 50° e 84°); i valori così ottenuti sono confrontati con H_{10} e H_{50} della media geometrica della componente orizzontale dei segnali registrati entro i 15 km.

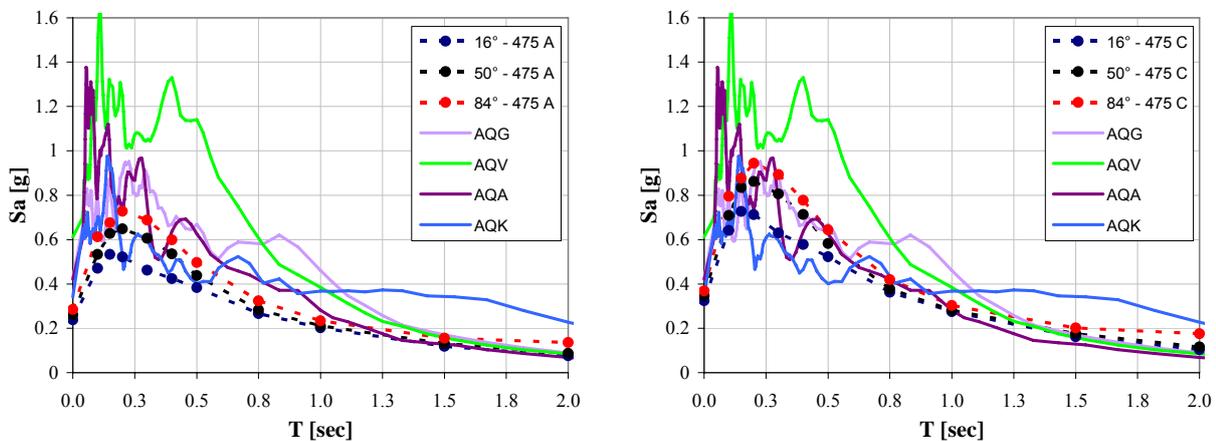


Figura 11. Spettri di accelerazione della media geometrica dei segnali registrati entro i 15 km confrontati con quelli di norma per T_R 475 anni su suolo A (sinistra) e C (destra).

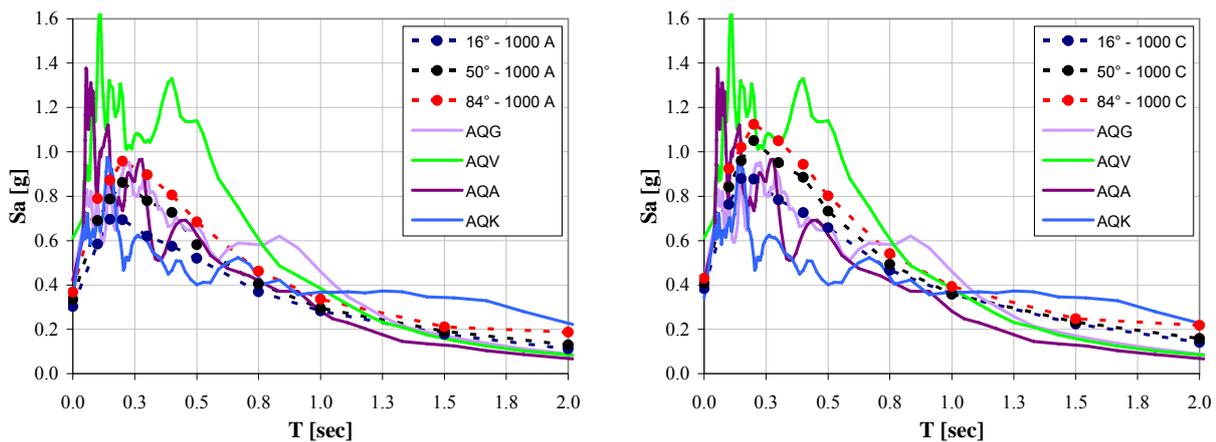


Figura 12. Spettri di accelerazione della media geometrica dei segnali registrati entro i 15 km confrontati con quelli di norma per T_R 1000 anni su suolo A (sinistra) e C (destra).

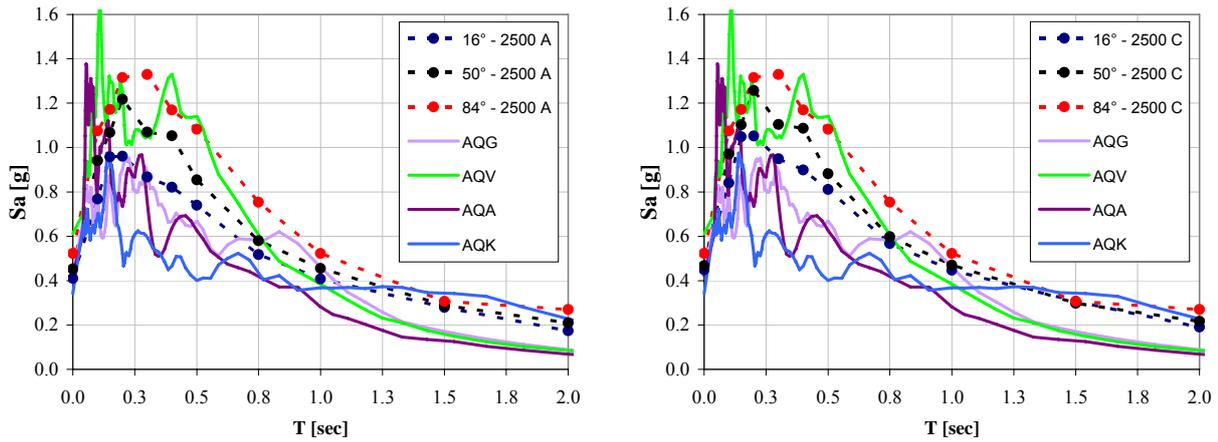


Figura 13. Spettri di accelerazione della media geometrica dei segnali registrati entro i 15 km confrontati con quelli di norma per T_R 2500 anni su suolo A (sinistra) e C (destra).

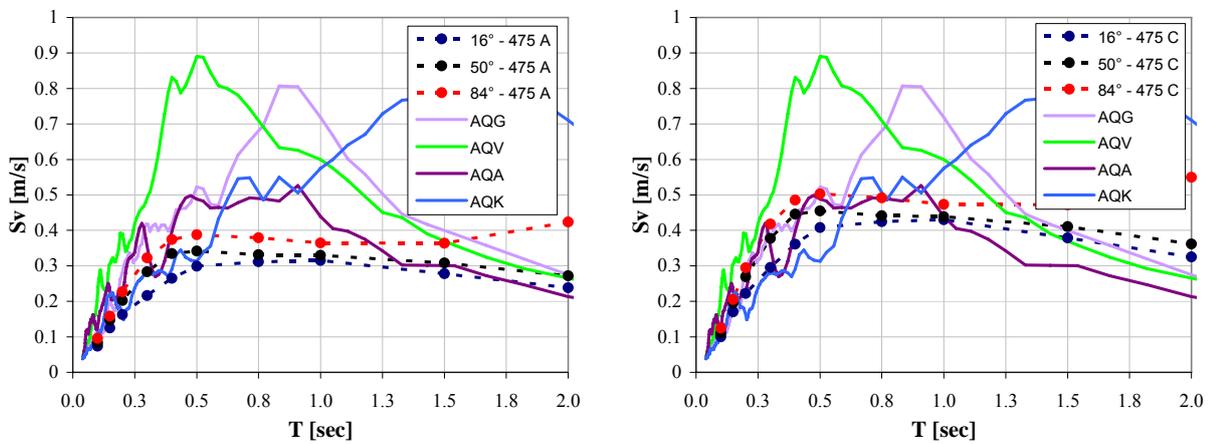


Figura 14. Spettri di velocità della media geometrica dei segnali registrati entro i 15 km confrontati con quelli di norma per T_R 475 anni su suolo A (sinistra) e C (destra).

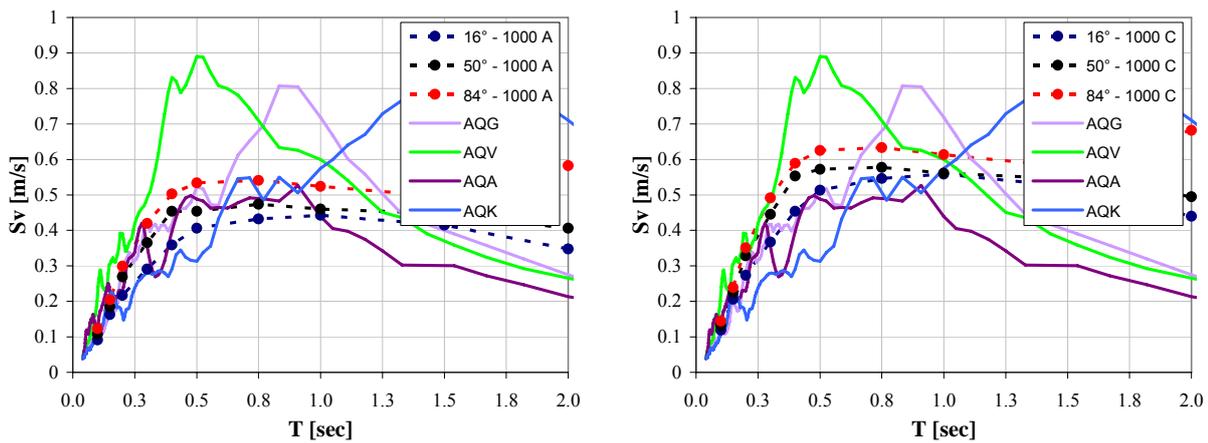


Figura 15. Spettri di velocità della media geometrica dei segnali registrati entro i 15 km confrontati con quelli di norma per T_R 1000 anni su suolo A (sinistra) e C (destra).

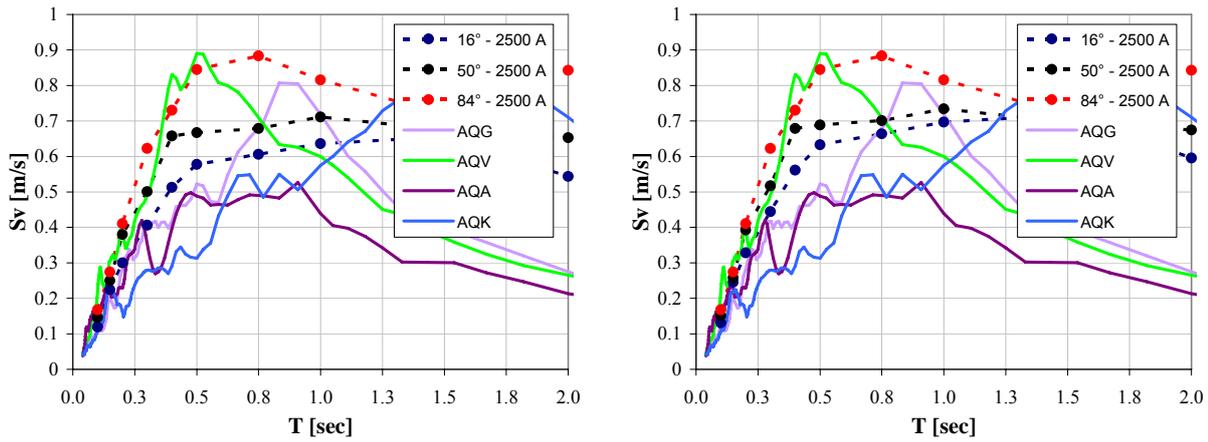


Figura 16. Spettri di velocità della media geometrica dei segnali registrati entro i 15 km confrontati con quelli di norma per T_R 2500 anni su suolo A (sinistra) e C (destra).

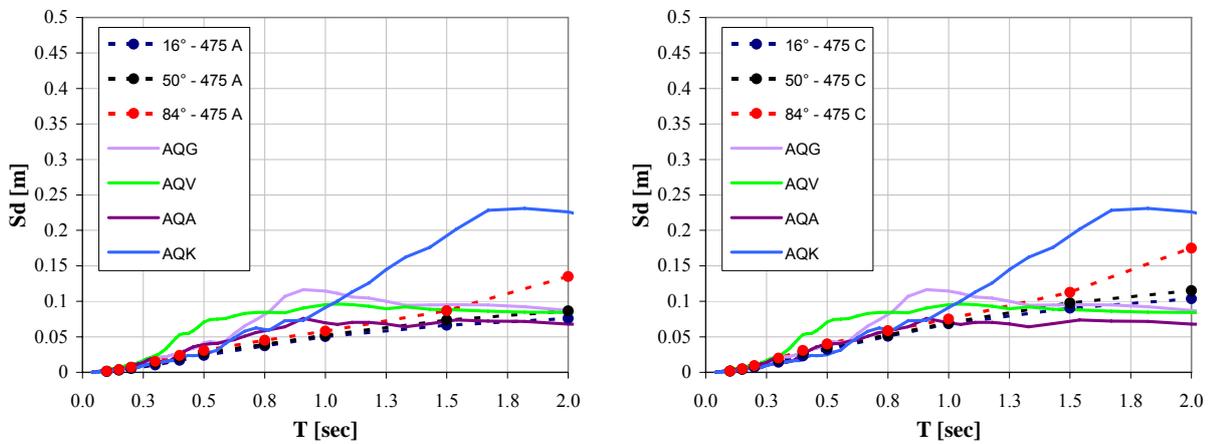


Figura 17. Spettri di spostamento della media geometrica dei segnali registrati entro i 15 km confrontati con quelli di norma per T_R 475 anni su suolo A (sinistra) e C (destra).

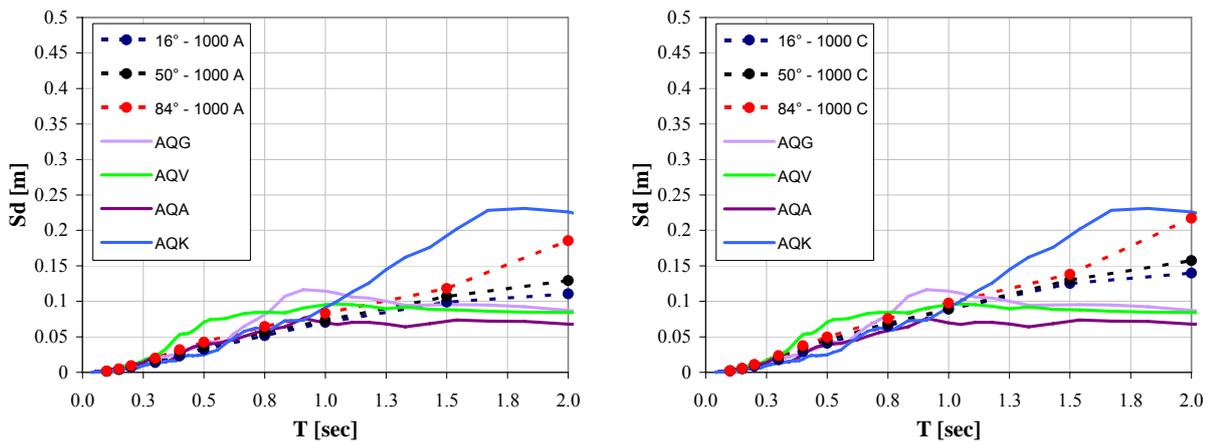


Figura 18. Spettri di spostamento della media geometrica dei segnali registrati entro i 15 km confrontati con quelli di norma per T_R 1000 anni su suolo A (sinistra) e C (destra).

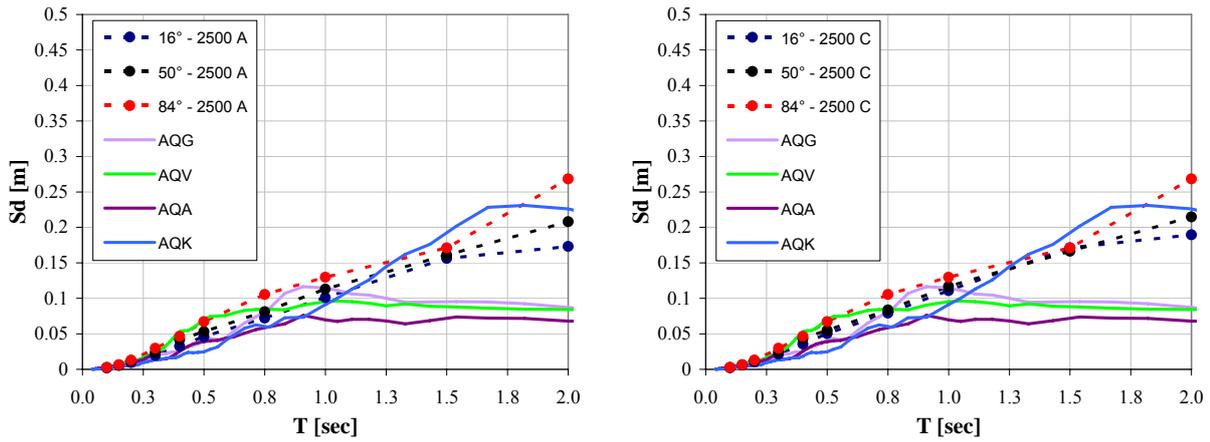


Figura 19. Spettri di spostamento della media geometrica dei segnali registrati entro i 15 km confrontati con quelli di norma per T_R 2500 anni su suolo A (sinistra) e C (destra).

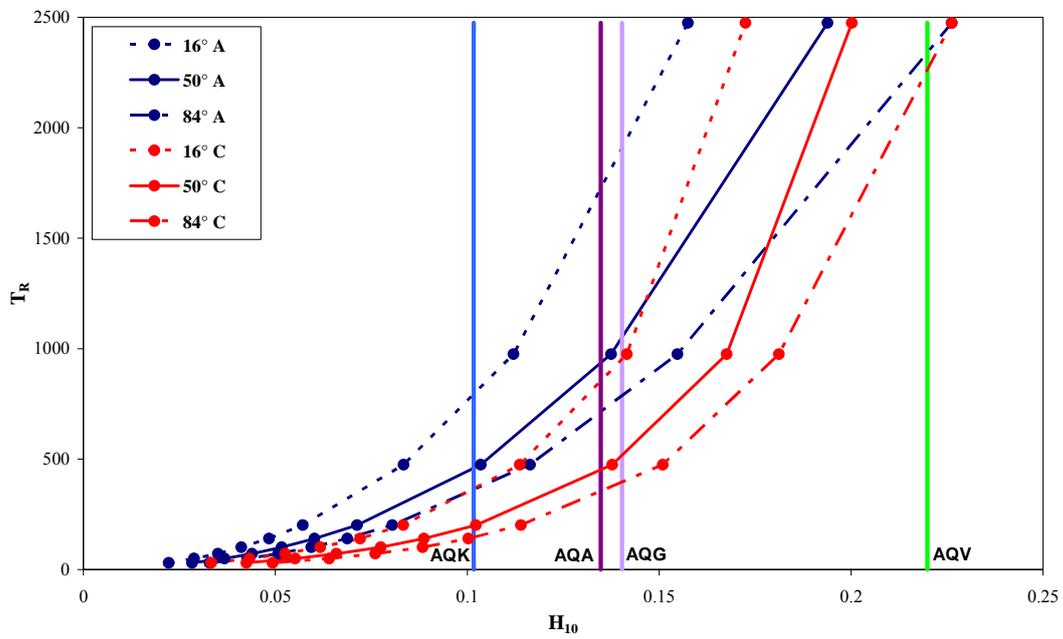


Figura 20. H_{10} valutata sugli spettri UHS al variare del percentile e del tipo di suolo confrontata con il valore di H_{10} per i segnali registrati entro i 15 km.

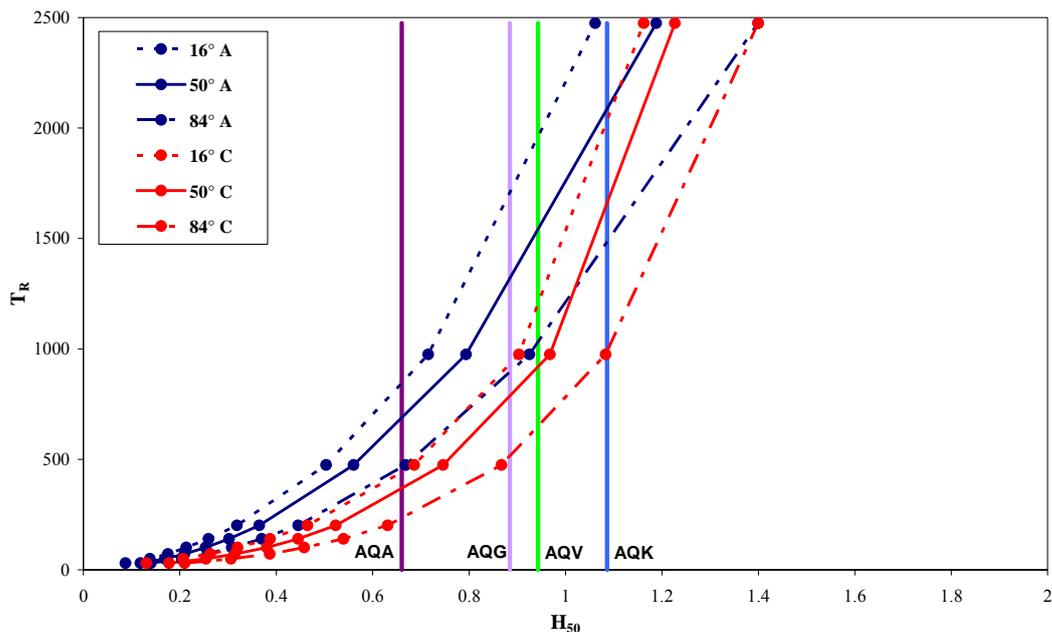


Figura 21. H_{50} valutata sugli spettri UHS al variare del percentile e del tipo di suolo confrontata con il valore di H_{50} per i segnali registrati entro i 15 km.

Confronto curve $S_a(T) - T_R$ con i segnali registrati entro i 15 km

Le curve periodo di ritorno (T_R) per 10 prefissati valori di ordinata spettrale $S_a(T)$, per tipologia di suolo (A e C) e per tre diversi percentili (15° , 50° e 84°) sono riportate nei grafici da Figura 22 a Figura 32, tali valori sono confrontati con le ordinate spettrali della media geometrica delle componenti orizzontali dei segnali registrati nelle stazioni entro i 15 km dalla rottura. L'eventuale intersezione dei dati relativi alle stazioni e quelli di norma conduce ad una valutazione approssimativa del periodo di ritorno corrispondente secondo norma alle ordinate spettrali delle registrazioni.

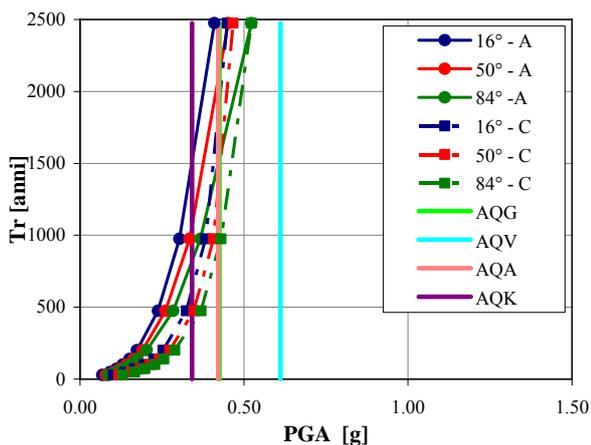


Figura 22

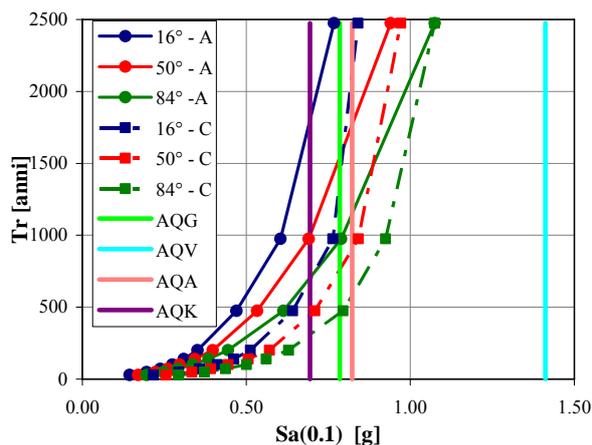


Figura 23

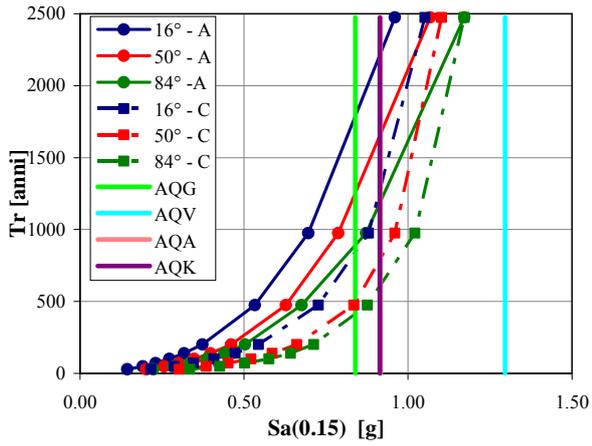


Figura 24

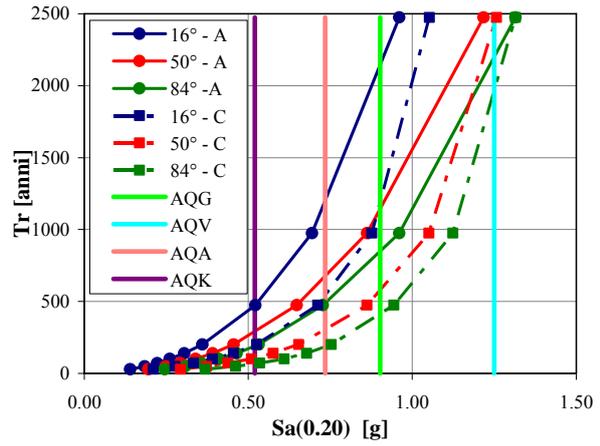


Figura 25

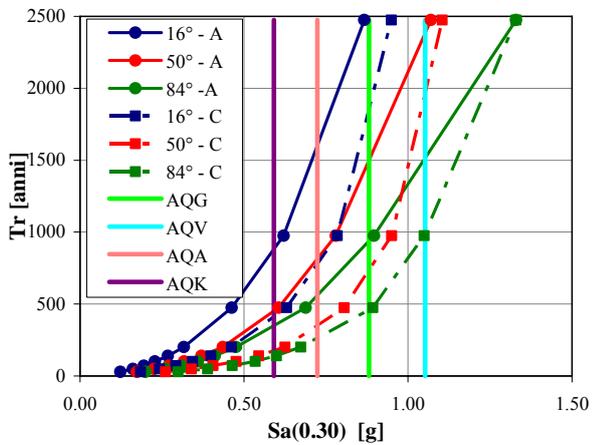


Figura 26

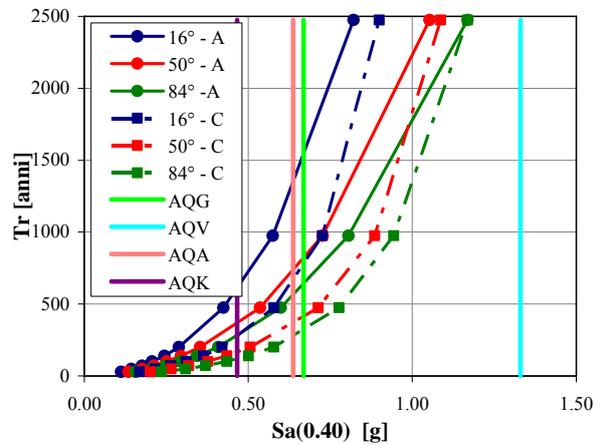


Figura 27

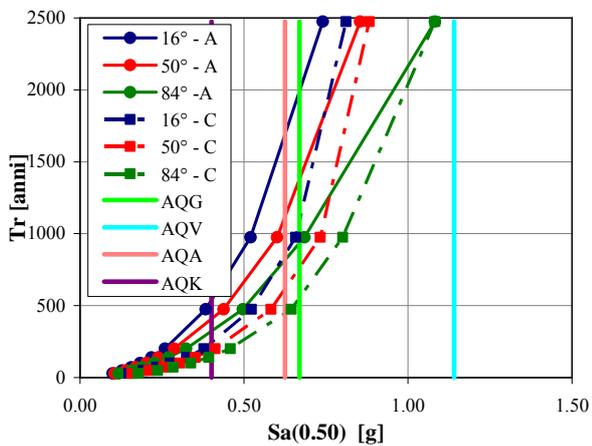


Figura 28

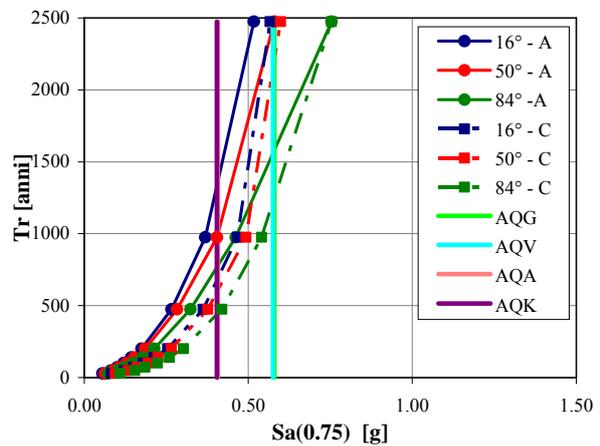


Figura 29

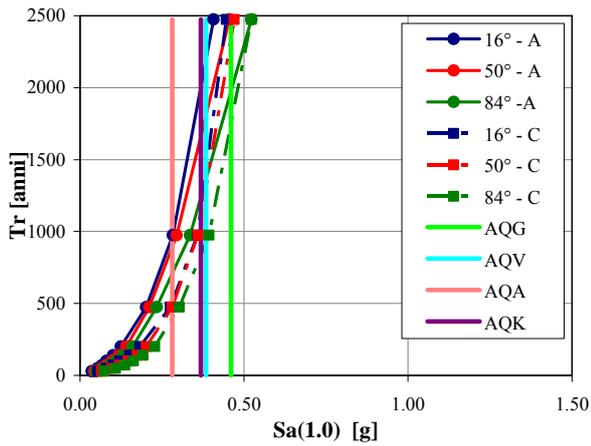


Figura 30

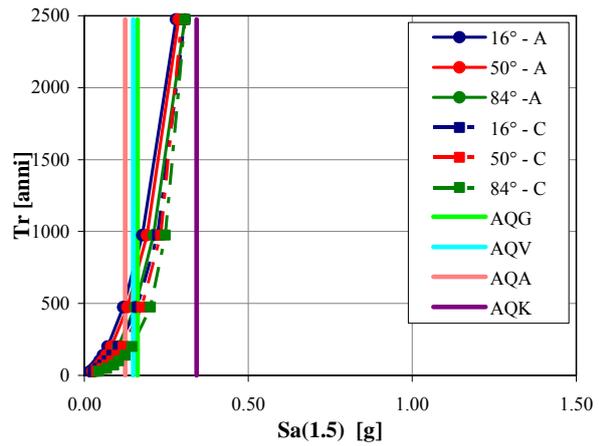


Figura 31

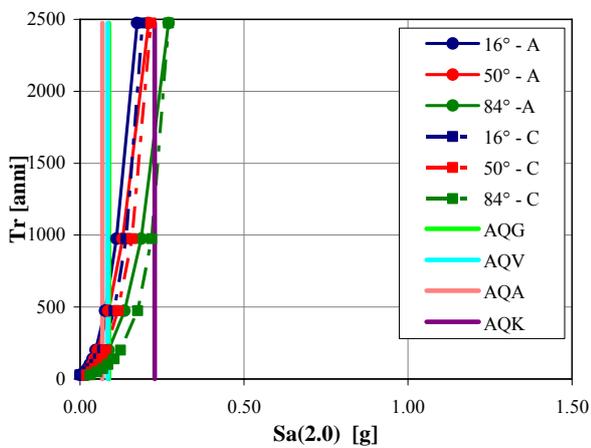


Figura 32

Effetti di campo vicino (direttività)

La direttività è un fenomeno, noto da molti anni e legato alle direzioni prevalenti di propagazione della rottura ed alla distribuzione dello spostamento sul piano di faglia. Esso può essere causa di un moto sismico al suolo con caratteristiche peculiari (Somerville et al., 1997). In particolare, la traccia di velocità può essere caratterizzata, nelle prime fasi, da un ciclo a bassa frequenza (impulso) nel quale si concentra una parte dell'energia presente nel segnale. Tale caratteristica del moto è detta di *campo vicino*, perché si può tipicamente osservare nelle zone con distanza dalla faglia non superiore alle dimensioni della sorgente. Ciò che succede è schematicamente rappresentato in Figura 33, per semplicità relativa a un terremoto di tipo *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 se la rottura questo effetto si perde o non è affatto presente e l'energia portata in dote dal segnale è distribuita più uniformemente (Sito1).



Figura 33. Rappresentazione schematica del fenomeno di direttività nel caso strike-slip (adattata da Kramer, 1996).

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 range di periodi intorno al periodo dell'impulso (T_p); (3) essendo l'impulso generalmente a bassa frequenza (comparabile con i periodi fondamentali tipici delle strutture) la domanda inelastica associata al segnale può essere particolarmente intensa. Baker (2007) ha sviluppato un metodo per identificare le storie di velocità con un impulso all'inizio del segnale che quindi verosimilmente derivano da effetti di campo vicino. L'algoritmo proposto, attraverso un'analisi wavelet dei segnali registrati, assegna a ciascun record un indice (*score*) 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 score compresi tra 0.15 e 0.85. Indipendentemente dal valore dello score, l'algoritmo identifica il periodo del potenziale impulso (T_p) per ciascun segnale insieme con un indice di ritardo (*Late*) che può assumere valori pari a 0 o a 1; in questo secondo caso, l'impulso non avviene nelle prime fasi del segnale e non è quindi considerato derivante da direttività.

Il metodo è stato utilizzato per l'analisi dei segnali del terremoto de L'Aquila registrati dalle 13 stazioni della Rete Accelerometrica Nazionale (RAN); si veda Chioccarelli e Iervolino (2009a, 2009b) per i dettagli. I segnali sono stati ruotati dalle direzioni originali Est-Ovest (EW) e Nord-Sud (NS) alle direzioni ortogonali (FN) e parallele allo strike (FP) della sorgente, in quanto è nella prima che ci si attende di trovare eventuali effetti impulsivi, mentre nella seconda essi dovrebbero essere meno significativi (Somerville et al., 1997). I segnali processati sono quelli delle 13 stazioni con distanza dalla faglia non superiore a circa 30 km. Di queste 7 presentano una delle componenti orizzontali di tipo impulsivo: 6 in direzione FN e una sola in direzione FP (stazione AQV). Peraltro in questo ultimo caso la componente FN del segnale è classificata come ambigua. In Tabella 5 sono riportati i valori di T_p per tutte i segnali classificati come impulsivi e per tutte le componenti ad essi ortogonali.

Componente	Classificato come impulsivo	T_p [sec]
AQV_FN	NO	0.53
AQV_FP	SI	1.06
AQG_FN	SI	1.02
AQG_FP	NO	1.11
AQA_FN	SI	0.74
AQA_FP	NO	0.62
AQK_FN	SI	1.99
AQK_FP	NO	1.26
GSA_FN	SI	3.13
GSA_FP	NO	1.97
GSG_FN	SI	4.03
GSG_FP	NO	5.17

ORC_FN	SI	0.83
ORC_FP	NO	4.47

Tabella 5. Risultati della classificazione dei segnali orizzontali.

Si evidenzia che le quattro stazioni più vicine alla faglia (AQV, AQG, AQA ed AQK) presentano tutte segnali impulsivi. 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.

Iervolino e Cornell (2008) hanno proposto un modello probabilistico per stimare la probabilità di avere un impulso near-fault. Tale modello è funzione di semplici parametri geometrici che rappresentano la distanza dalla faglia (R), la porzione di rottura che va verso il sito (d) e l'allineamento tra il sito e faglia (ϕ). Nel caso di terremoto di tipo *normale* (o dip-slip), quale quello aquilano, tali parametri vanno stimati nel piano verticale ortogonale alla rottura come schematicamente riportato in Figura 34.

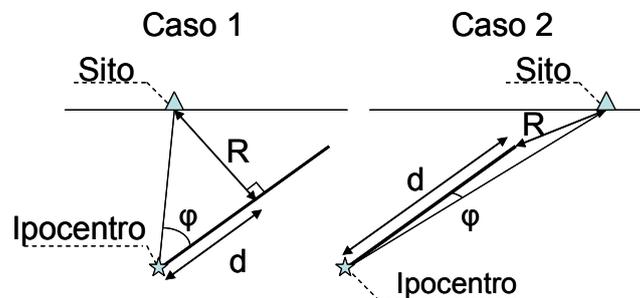
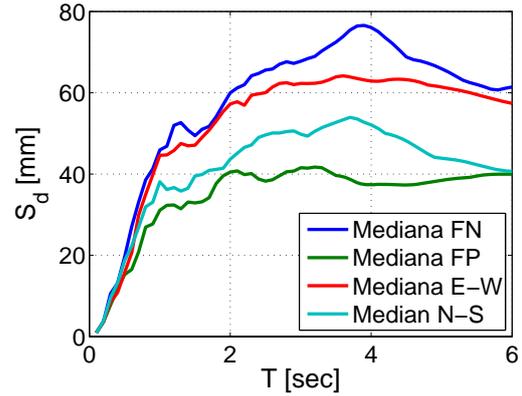
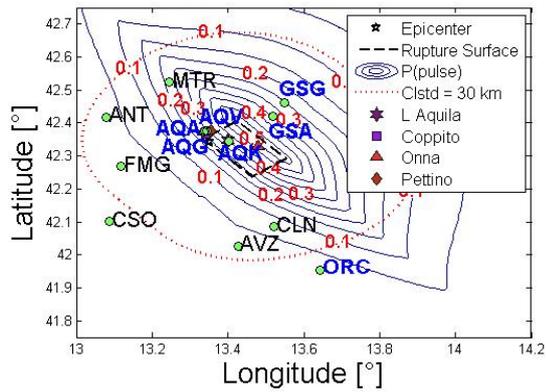


Figura 34. Schema di calcolo dei parametri geometrici.

Trattandosi di un modello di previsione, l'applicazione naturale dello stesso è nelle analisi di pericolosità a faglie note. Il modello è stato comunque applicato al caso della rottura che ha determinato il terremoto aquilano e la Figura 35a mostra il contour della probabilità di impulso ottenuto. Nella stessa figura sono evidenziate in blu le stazioni con segnali impulsivi (rispetto alle componenti ortogonali e parallele alla rottura). In Figura 35b sono riportati gli spettri elastici di spostamento (S_d) 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.

Le Figure 36 mostrano inoltre le medie dei rapporti (in termini logaritmici) degli spettri di spostamento elastici ruotati (FN e FP) rispetto ai non ruotati (EW e NS) e dimostrano che la rotazione in direzione FN e FP è maggiormente significativa nel caso di stazioni con segnali impulsivi (Figure 36a) rispetto al caso di stazioni non impulsive (Figure 36b).

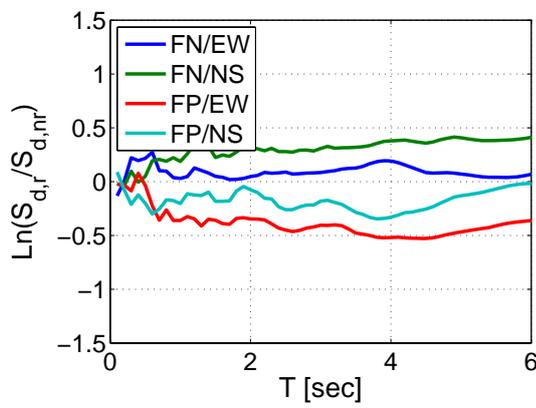
A completamento del confronto tra le componenti non ruotate (EW e NS) e ruotate (FN, FP), si riportano, in Figura 37, i grafici relativi all'analisi dei segnali registrati dalla stazione AQK. Per ognuna delle quattro direzioni considerate la figura mostra il segnale registrato in termini di velocità, l'impulso estratto tramite l'algoritmo di Baker ed il segnale di velocità residuo ovvero ottenuto sottraendo l'impulso al segnale originale. Appare evidente come la rotazione in direzione FN e FP permetta di identificare le direzioni in cui l'effetto impulsivo è rispettivamente massimo e minimo a fronte dei risultati ottenuti per le componenti non ruotate che risentono dell'impulso in modo sostanzialmente equivalente.



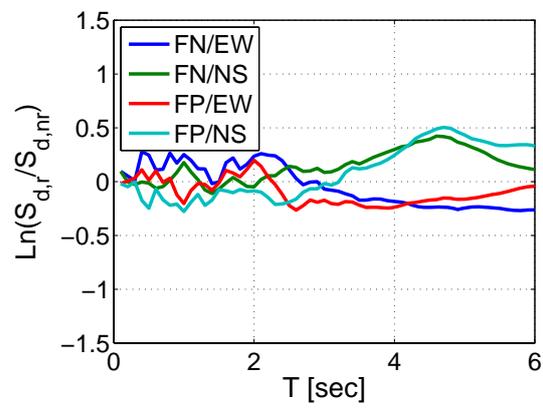
(a)

(b)

Figura 35. (a). Distribuzione in pianta della probabilità di osservare segnali impulsivi; (b) Spettri di spostamento elastici medi per le 7 stazioni impulsivi.

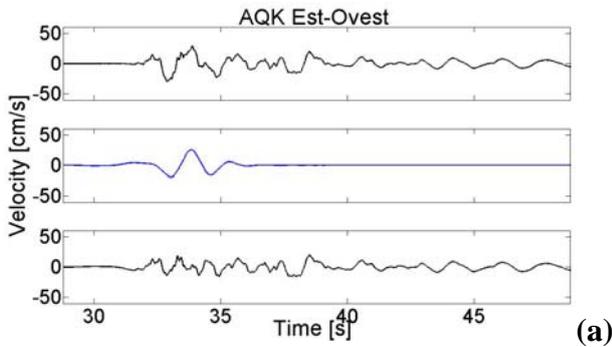


(a)

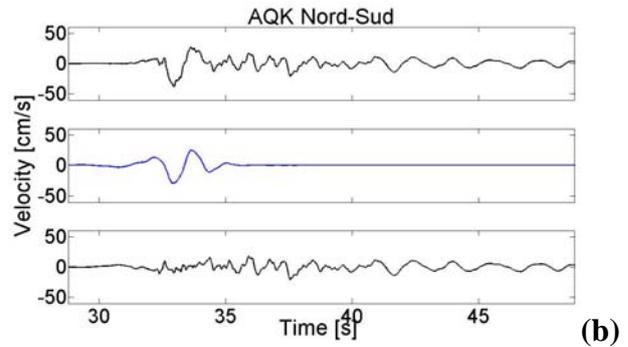


(b)

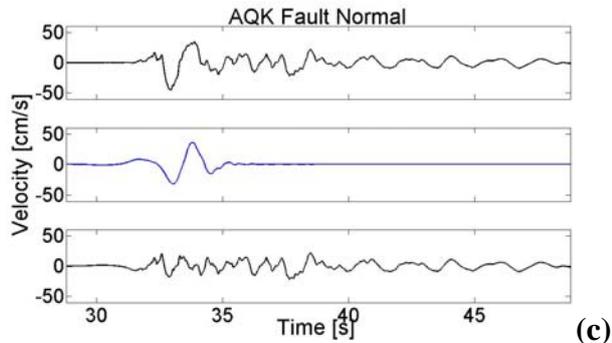
Figure 36. Confronto tra gli spettri di spostamento elastici ruotati e non ruotati nel caso di stazioni impulsivi (a) e non impulsivi (b).



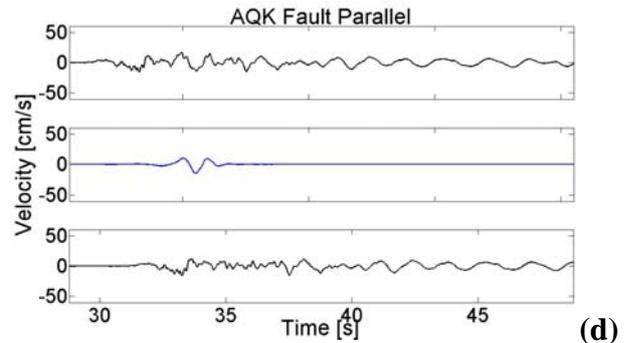
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 37. Segnali di velocità registrati, impulsi estratti e segnali residui per la stazione AQK rispettivamente in direzione EO, NS, FN, e FP.

Per poter analizzare i segnali registrati indipendentemente dalle rispettive distanze dalla faglia, si è scelto di calcolare gli scostamenti dei logaritmi dei valori di accelerazione spettrale ($S_{a,registrate}$) 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 ε , la cui espressione è riportata di seguito:

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

Si sono calcolati i valori di ε per le componenti FN e FP delle stazioni con segnali impulsivi (Pulse) in direzione FN, nonché per i segnali non ruotati (Unrot.): in questo caso, a ciascuna stazione è stato associato il segnale medio dei due registrati (EW e NS) e si sono calcolate le ε medie tra le stazioni con e senza impulsi in direzione FN. La Figura 38 (sinistra) riassume i risultati ottenuti e calcolati in funzione del periodo spettrale (T) adimensionalizzato rispetto al periodo di impulso T_p di ciascun record. Si nota come le curve associate a stazioni con impulso siano significativamente maggiori rispetto a quelle associate a stazioni senza impulsi. La Figura 38 (destra) mostra la disaggregazione della PGA di progetto con periodo di ritorno 475 anni su roccia (dati <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>) che mostra come il terremoto che ha una più alta probabilità di causare il superamento della PGA con periodo di ritorno a L'Aquila sia un terremoto di magnitudo circa 5.5 a 10km e quindi è più piccolo di quello occorso.

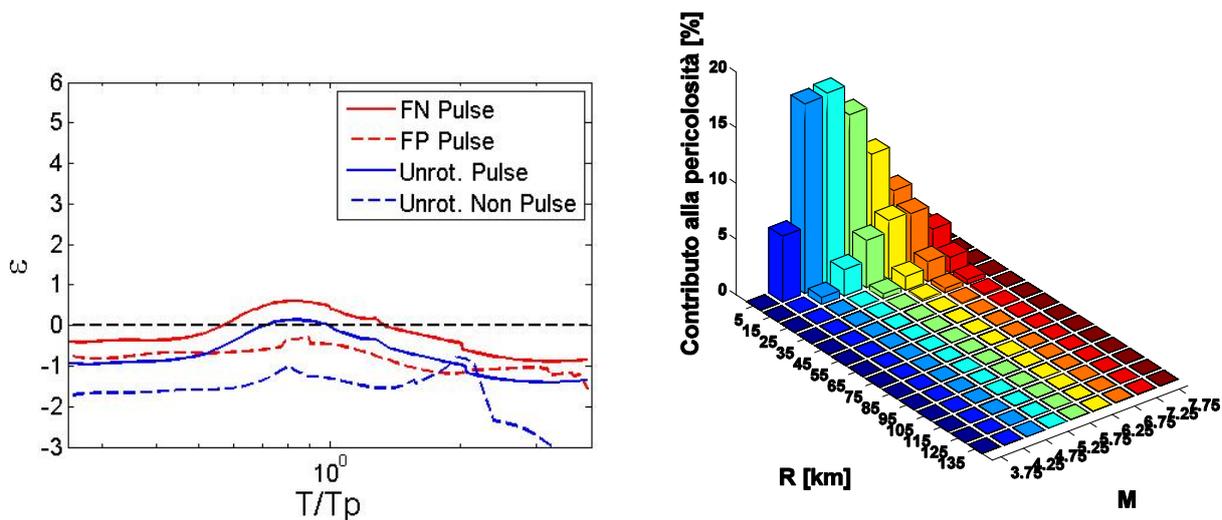


Figura 38. ε medie calcolate per le stazioni con segnali impulsivi e disaggregazione della ag (0.26g) con periodo di ritorno 475 anni.

Per studiare la domanda sismica inelastica associata ai segnali registrati, si è fatto riferimento a una serie di sistemi ad un solo grado di libertà (SDoF) elasto-plastici con rapporto di incrudimento del 3%, smorzamento del 5% e fattore 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. Ciò rende i risultati indipendenti dall'intensità di ciascun segnale.

I grafici ottenuti sono riportati in Figura 39 (l'asse delle ascisse è adimensionale rispetto al T_p) 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*), invece si registra un incremento significativo di spostamento 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 (e quindi va a coincidere col 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.

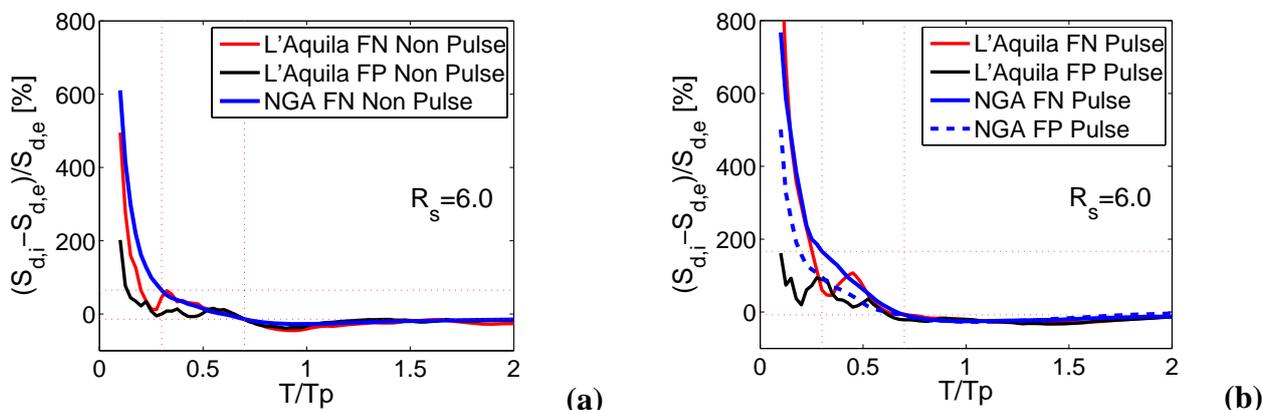


Figura 39. a and b – Rapporto tra la domanda di spostamento inelastica ed elastica per R_s pari 6 nel caso di stazioni non impulsive (a) ed impulsive (b).

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.

L'attuale normativa sismica nazionale e gli effetti di direttività campo vicino

Il DM 14/01/2008 ha introdotto, per tutto il territorio italiano, spettri di progetto che sono funzione delle coordinate geografiche del sito considerato e non più della macrozona sismica in cui tale sito ricade (come accadeva per le normative precedenti). Tale introduzione rappresenta un grosso passo in avanti in termini di definizione delle azioni sismiche di progetto al sito poiché, grazie ad essa, è oggi possibile considerare gli spettri di norma praticamente coincidenti con gli spettri ad hazard uniforme ottenuti da un'analisi probabilistica su scala nazionale. In particolare il riferimento su cui si basa il DM è il risultato del *Gruppo di Lavoro MPS04* dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) che, nel 2004, ha prodotto le Mappe di Pericolosità Sismica, identificate appunto con la sigla MPS04. Nelle analisi eseguite si è utilizzato un approccio ad *albero logico*, in grado di tener in conto le seguenti variabilità epistemiche: (i) intervalli di completezza dei cataloghi sismici derivati secondo un approccio "storico" o "statistico"; (ii) tassi di sismicità costanti o variabili nel tempo; e (iii) diverse leggi di attenuazione (Montaldo et al., 2007). Le variabili di cui non si tiene conto nell'albero logico, ovvero che sono assunte come dati deterministici del problema, sono il modello di sorgenti a zone sismogenetiche ("*Zonizzazione Sismogenetica ZS9*") ed il catalogo dei terremoti ("*Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani 2004*"). L'albero logico utilizzato, con i pesi associati a ciascun modello, è mostrato in Figura 40.

Dalla scelta di utilizzare un albero logico deriva che i parametri della pericolosità forniti dalla normativa sono valori medi di una distribuzione della quale sono disponibili anche i valori corrispondenti al 16 ed 84° percentile (<http://zonesismiche.mi.ingv.it/elaborazioni/download.php>).

Da quanto finora detto, è quindi chiaro non solo che la direttività è un fenomeno di cui non si tiene conto nella valutazione della pericolosità di norma, ma anche che, essendo fortemente dipendenti dalla geometria della singola faglia, gli effetti direttivi non sono attualmente considerabili dall'approccio normativo, che, come detto, utilizza zone sismogenetiche omogenee. Peralto poiché la percentuale dei terremoti impulsivi in un database tipo sul quale vengono tarate le leggi di attenuazione è dell'ordine del 20%-30% e poiché tale percentuale di registrazioni sarà anche

caratterizzata da una distribuzione significativamente dispersa di periodi di impulso (che tanto influiscono sulle caratteristiche dei segnali e sulle risposte strutturali) è lecito pensare che anche nelle leggi di attenuazione ordinarie gli effetti direttivi siano praticamente trascurati.

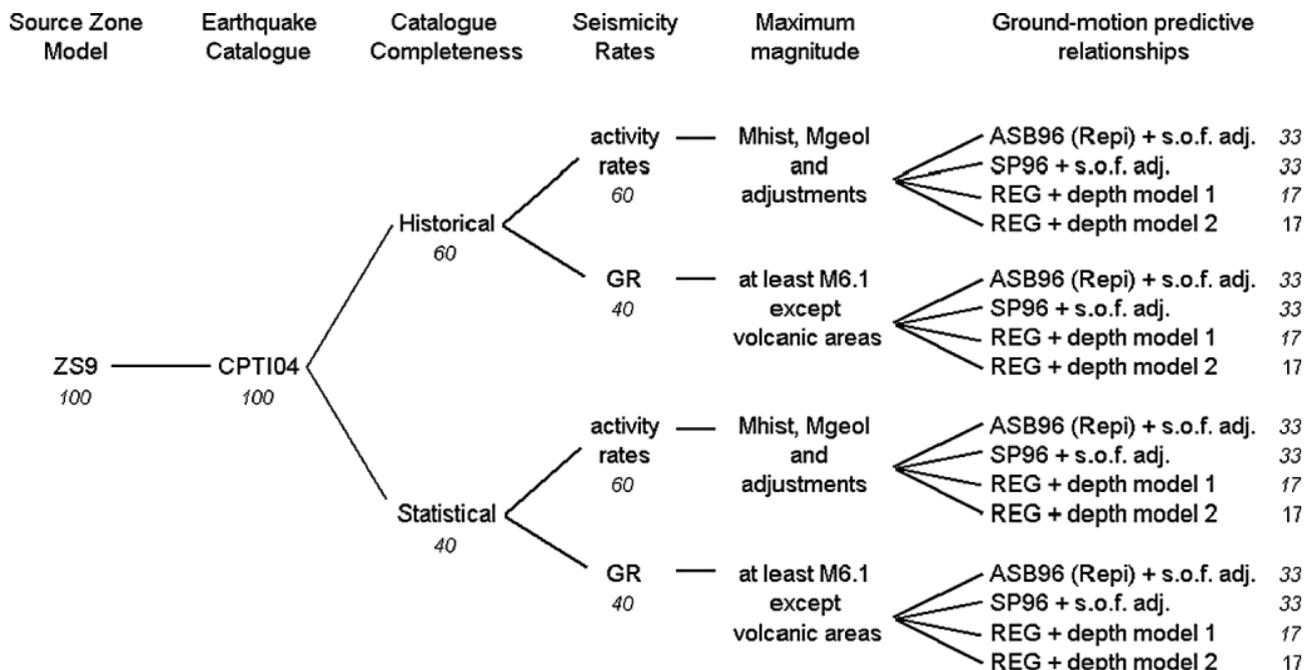


Figura 40. Albero logico utilizzato per il calcolo delle MPS04 (Montaldo et al., 2007).

Considerazioni conclusive

Dall'analisi dei segnali registrati vicino alla sorgente nel terremoto de L'Aquila e dal confronto con l'azione sismica valutata secondo la recente normativa italiana, si evidenziano due gruppi di registrazioni, il primo relativo ai segnali registrati entro 15 km dall'epicentro e il secondo da quelli registrati oltre. I valori massimi sia dei parametri di picco (spettrali) che integrali (intensità/durata) di quest'ultimo gruppo sono largamente inferiori rispetto agli spettri di norma relativi a periodi di ritorno da 475 anni in poi. Tuttavia un gruppo di registrazioni, quelle in prossimità della sorgente, presenta spettri elastici e intensità che sono generalmente compresi tra gli spettri normativi relativi a periodi di ritorno tra 475 e 2500 anni. Tralasciando di discutere l'effettiva rarità del terremoto occorso (i.e., il periodo di ritorno della magnitudo sulla faglia in questione), analisi di dettaglio dei segnali hanno evidenziato che alcuni di questi, quelli più intensi per l'appunto, possono essere stati influenzati da effetti di campo vicino (direttività). Tale fenomeno provoca segnali particolarmente intensi e di tipologia non ordinaria in zone specifiche del territorio prossime alla faglia ed è osservabile solo se i siti costruiti sono in una configurazione geometrica specifica rispetto alla sorgente del terremoto, quindi in condizioni molto particolari. Gli effetti di campo vicino, sebbene siano noti all'ingegneria sismica e alla sismologia da molto tempo, sono stati solo recentemente approfonditi in modo da poter essere in futuro inclusi nelle analisi di pericolosità sismica e quindi nella determinazione delle azioni di progetto, a condizione che si riesca ad avere una conoscenza più completa e dettagliata delle principali faglie del territorio nazionale. Infatti, sebbene lo studio che ha portato alla attuale mappa pericolosità italiana rappresenta comunque uno strumento all'avanguardia mondiale, esso non può essere in grado di tenere conto puntualmente degli effetti di campo vicino. Tuttavia, va sottolineato come, da un lato, molti edifici in zona epicentrale, anche vicini alle stazioni accelerometriche che hanno evidenziato effetti direttivi, hanno ben resistito al terremoto, riportando danni lievi o nessun danno, dall'altro, che le nuove norme di progettazione, fondate su principi quali quello della gerarchia delle resistenze, garantiscono una riserva di capacità sismica alle nuove strutture e di sicurezza rispetto al collasso tale da coprire anche questi effetti non facilmente prevedibili e quantizzabili ai fini normativi.

Bibliografia

- Ameri G., Augliera P., Bindi D., D'Alema E., Ladina C., Lovati S., Luzi L., Marzorati S., Massa M., Pacor F. and Puglia R. Strong-Motion parameters of the Mw = 6.3 Abruzzo (Central Italy) Earthquake. 2009, <http://esse4.mi.ingv.it>.
- Baker, J. W. (2007). Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions Using Wavelet Analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.* 97(5), 1486-1501.
- Chioccarelli E., Iervolino I. (2009a). Near-Source Seismic Demand and Pulse-Like Records: a Discussion for L'Aquila Earthquake. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. (in stampa)
- Chioccarelli E., Iervolino I. (2009b) Direttività e azione sismica: discussione per l'evento de L'Aquila, atti di XIII Convegno Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia" , Bologna, giugno 2009. [http://www.reluis.it/doc/pdf/Aquila/Chioccarelli_e_Iervolino_Direttivita.pdf]
- Chioccarelli, E., De Luca, F., Iervolino, I. (2009). Preliminary Study of L'Aquila Earthquake Ground Motion Records. [http://www.reluis.it/doc/pdf/Aquila/Peak_Parameters_L_Aquila_Mainshock_V5.2.pdf]
- CS.LL.PP; DM 14 Gennaio 2008 Allegato A alle Norme Tecniche per le Costruzioni: Pericolosità Sismica. *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, 29.
- 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.
- Kramer, S. L., *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, 1996.
- Montaldo, V., Meletti, C., Martinelli, F., Stucchi, M., Locati, M. (2007). On-Line Seismic Hazard Data for the New Italian Building Code, *Journal of Earthquake Engineering*, 11, 119-132.
- Reiter, L., (1990). *Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insights*, Columbia University Press.
- Sabetta, F. and Pugliese, A. (1996) Estimation of Response Spectra and Simulations of Nonstationary Earthquake ground Motion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86(2), 337-352.
- 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.