

## 9 EFFETTI DI CAMPO VICINO NEL TERREMOTO DI L'AQUILA

• Iervolino I.  
Università di Napoli

### 9.1 Direttività e azione sismica strutturale

Al verificarsi di un evento sismico, le zone vicine alla sorgente possono essere interessate da fenomeni chiamati dai sismologi di "direttività". Tali effetti sono definiti di campo vicino, o near-source, perché legati alle direzioni prevalenti di propagazione della rottura e dello scorrimento (*slip*) sulla faglia. A causa di essi il moto al suolo di un sito che si trova in determinate condizioni geometriche in prossimità della sorgente può avere delle caratteristiche peculiari. In particolare, la storia di velocità in direzione ortogonale alla faglia

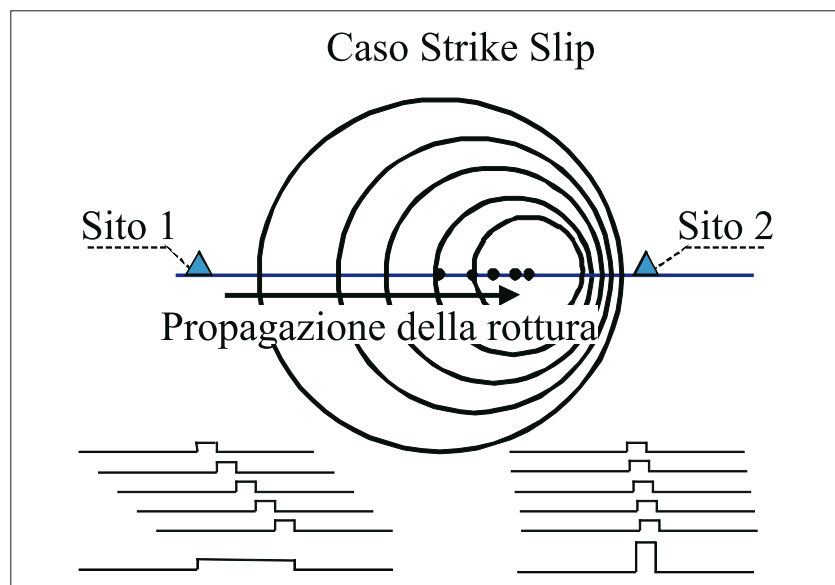


Fig. 9.1 → Rappresentazione schematica dell'interferenza costruttiva nel caso di terremoti strike-slip.

può presentare, nelle prime fasi del segnale, un ciclo a bassa frequenza ("l'impulso") nel quale si concentra gran parte dell'energia (Somerville *et al.* 1997).

Ciò che succede è schematicamente rappresentato in figura 9.1, per semplicità relativa a un terremoto di tipo *strike-slip*. 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 sismiche e quindi la formazione 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 e l'energia portata in dote dal segnale è distribuita più uniformemente (Sito1).

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 è atteso attenuato in direzione parallela. Nel caso dei terremoti normali o *dip-slip*, la componente impulsiva del segnale è in direzione ortogonale al piano di rottura e di conseguenza ha componenti sia nel piano orizzontale sia nel piano verticale; tuttavia, per quanto riguarda il piano orizzontale, si fa semplicemente riferimento alle direzioni ortogonale (FN) e parallela (FP) allo strike, figura 9.2.

Gli effetti della direttività, visti in questi termini, sono d'interesse per l'ingegneria sismica. Infatti, le strutture che hanno un periodo fondamentale di oscillazione pari a una certa frazione del periodo dell'impulso, andando in campo non lineare ed essendo soggette a "elongazione" del periodo, possono subire una richiesta anomala di prestazione inelastica, dove l'anomalia è intesa rispetto ai terremoti che non presentano l'impulso, detti anche "ordinari".

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 della progettazione strutturale richiede anche la prevedibilità del periodo e dell'ampiezza dell'impulso. Le correnti leggi di attenuazione e l'analisi probabilistica di pericolosità sismica classica non sono in grado di tenere opportunamente in conto la forma spettrale precipua

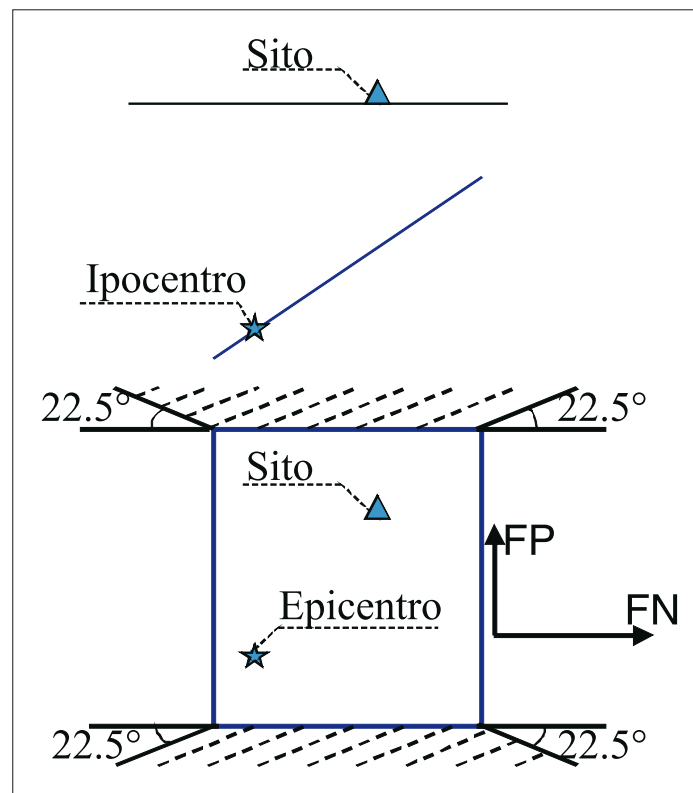


Fig. 9.2 → Direzioni FN e FP orizzontali per i terremoti dip-slip (adattata da Somerville 1997).impulsive de L'Aquila e di terremoti passati (NGA).

di questo tipo di terremoti né, quindi, di stimare la domanda sismica che ne deriva per le strutture.

Nel seguito del lavoro gli aspetti d'interesse strutturale della direttività sono analizzati e discussi in relazione al *mainshock* del terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009. In particolare, si discutono brevemente le analisi che sono state condotte per identificare eventuali impulsi di velocità presumibilmente legati alla direttività nei segnali registrati in prossimità della sorgente e i conseguenti incrementi delle azioni. Per una più estesa e dettagliata discussione si rimanda il lettore a Chioccarelli e Iervolino (2010).



gramma associa a ciascun record uno score compreso tra 0 e 1 relativo a quale frazione dell'energia del segnale è portata dall'impulso. Baker suggerisce di considerare impulsivi i record con *score* superiore a 0.85 e non impulsivi i record con score minore dello 0.15 e classifica come ambigui quelli intermedi.

2. 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 deriva da effetti di sito o altro, mentre la seconda esclude le registrazioni con *peak ground velocity* (PGV) minore di 30 cm/sec. Nel caso studiato la condizione sulla PGV è stata trascurata.

L'analisi dei dati di L'Aquila registrati entro 30 km mostra che 8 di essi sono ritenuti impulsivi, di questi solo uno è in direzione FP (AQV) mentre gli altri sono in direzione FN (le due componenti del segnale di AQV hanno

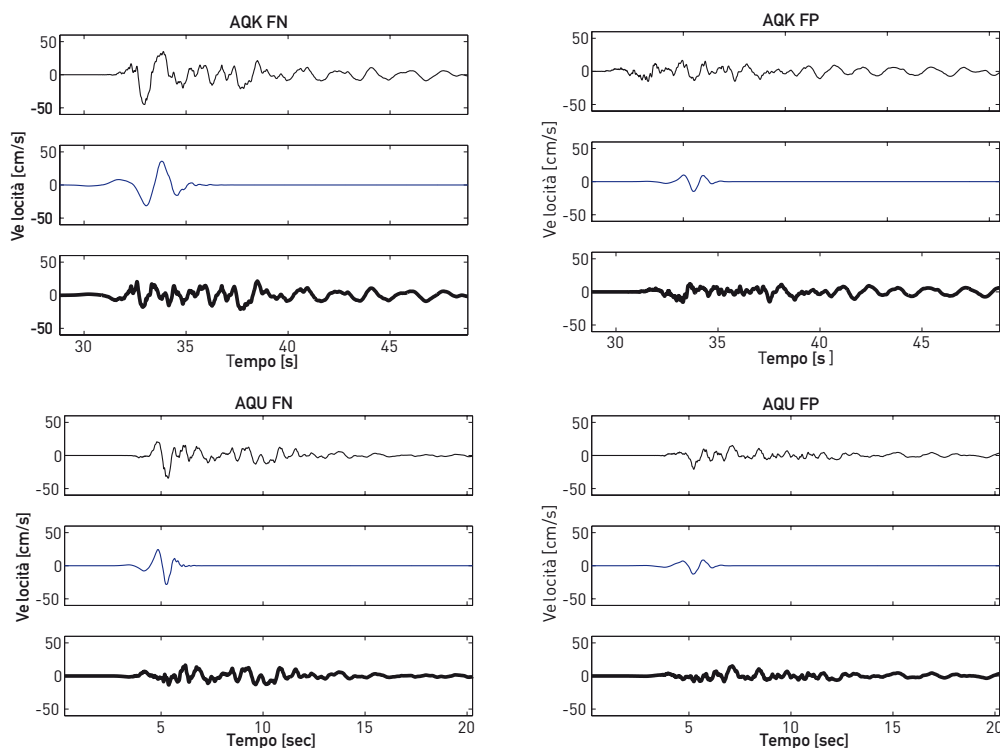


Figure 9.4 → Dall'alto in basso: storia di velocità, impulso estratto e segnale residuo per le componenti FN e FP delle stazioni AQK e AQU.

score molto simili, ma FN è classificato come ambiguo). La maggior parte dei segnali impulsivi identificati si trova in zone di maggiore probabilità nel modello di previsione di [figura 9.3](#).

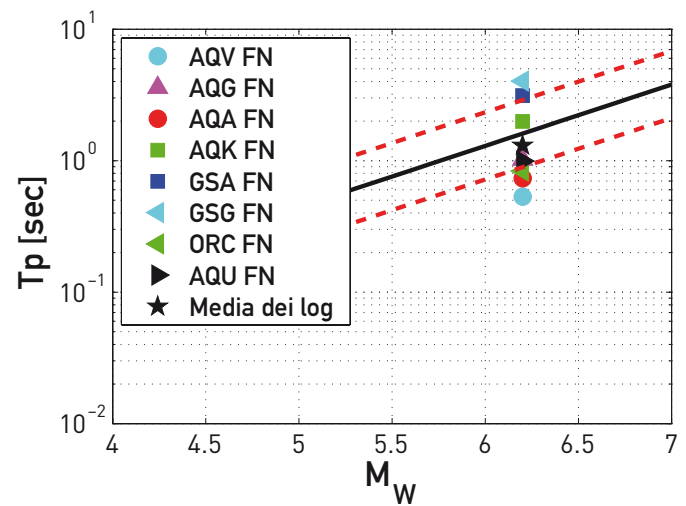
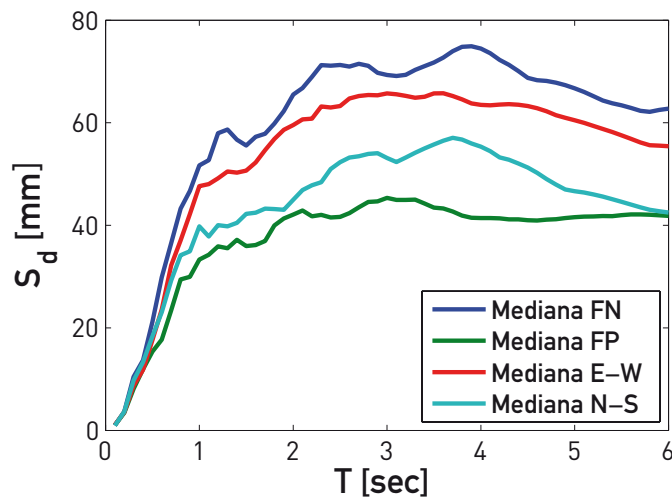
A titolo di esempio, in [figura 9.4](#) si riportano, per i segnali delle stazioni AQK e AQU, le storie di velocità registrate nelle direzioni normale e parallela allo strike. Inoltre si riportano gli impulsi estratti dai segnali e i segnali residui (ovvero depurati dagli impulsi). È particolarmente interessante osservare come, sebbene le due stazioni si trovino su condizioni di geologia locale molto diverse, un impulso sia presente all'inizio del segnale FN di entrambe le stazioni mentre esso è assente o trascurabile in direzione FP, come atteso.

La questione della rotazione in componenti normali e parallele alla faglia è un esercizio utile ad associare le caratteristiche dei segnali alla direttività. Per questo gli spettri di risposta in spostamento elastico delle stazioni impulsive di L'Aquila sono stati calcolati per le componenti così come registrate in direzione nord-

sud (NS) ed est-ovest (EW) e poi ruotate (Fig. 9.5). È evidente come la rotazione indichi le maggiori e minori richieste di spostamento in direzione FN e FP rispettivamente, mentre le direzioni NS ed EW forniscono risultati intermedi. Siccome alcuni studiosi hanno mostrato la dipendenza del periodo di impulso  $T_p$  dalla magnitudo dell'evento sismico, in figura 9.6 si mostrano i dati di L'Aquila rispetto a una regressione  $T_p$ - $M_W$  sulla base di terremoti passati, in particolare quelli utilizzati nel lavoro di Iervolino e Cornell (2008).

### 9.3 Effetti sulla risposta strutturale

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 sia non lineare. In generale, dalla figura 9.5 si evince che la componente normale alla rottura è anche quella strutturalmente più severa. Per studiare gli effetti della direttività anche in campo non lineare, si sono costruiti gli spettri dei rapporti tra il massimo spostamento inelastico e quello elastico per un sistema ad un grado di libertà (SDoF) con legame costitutivo bilineare caratterizzato dal 3% di incrudimento e da fattori di riduzione della resistenza ( $R_S$ , forza massima elastica diviso forza massima inelastica) costanti e pari a 2, 4, 6, 8 e 10. Tali spettri sono stati calcolati in funzione del rapporto  $T/T_p$ , in cui  $T$  è il periodo di oscillazione dello SDoF. In figura 9.7 sono riportati tali rapporti spettrali medi, per il solo  $R_S = 6$ , calcolati oltre che per i dati del terremoto de L'Aquila anche per le componenti impulsive di molti terremoti passati.

La figura evidenzia che i segnali impulsivi presentano, generalmente, un andamento delle richieste di spostamento inelastico, rapportate a quelle elastiche, maggiori in direzione FN rispetto a FP. In particolare si noti il picco a  $T/T_p = 0.5$  che indica, in accordo con le osservazioni storiche, l'incremento di richiesta inelastica per strutture che hanno un periodo fondamentale circa la metà di quello dell'impulso. Tuttavia, è da notare che le componenti FP delle stazioni impulsive hanno un andamento comunque simile seppur meno intenso. Gli stessi diagrammi, per  $R_S$  diversi, presentano andamenti compatibili con quello mostrato con differenze crescenti tra FN e FP all'aumentare di  $R_S$ ; si veda Chioccarelli e Iervolino (2010) per ulteriori dettagli.

Fig. 9.5 → Spettri elastici in spostamento delle stazioni impulsive per le componenti ruotate secondo FN e FP, NS ed EW.

Fig. 9.6 → Confronto tra i periodi di impulso calcolati ed i valori attesi da analisi di regressione di dati storici.

## 9.4 Considerazioni conclusive

Lo studio presentato si riferisce all'individuazione di effetti di interesse per l'ingegneria 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 di impulsi di velocità nei segnali ortogonali alla rottura. Attraverso un modello che prevede gli effetti di direttività nei terremoti di tipo 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 impulsivi. Successivamente, attraverso un'apposita procedura di decomposizione delle registrazioni entro circa 30 km dalla rottura, si sono identificate le stazioni che sembrano mostrano caratteristiche impulsive. La posizione di queste ultime è risultata, in generale, coerente con la mappa di probabilità.

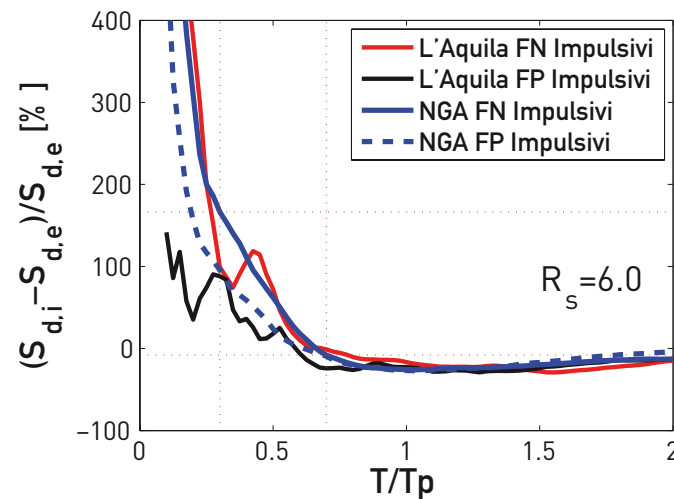


Fig. 9.7 → Medie dei rapporti spettrali calcolati per le componenti FN e FP delle stazioni impulsive de L'Aquila e di terremoti passati (NGA).

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 e che i periodi degli impulsi sono in buon accordo con quanto atteso per un terremoto di magnitudo momento 6.3.

Attraverso semplici analisi su strutture ad un solo grado di libertà, si è evidenziato che alle registrazioni di tipo direttivo è associata una domanda sismica superiore a quella associata ai segnali ortogonali ad essi e rispetto alle stesse componenti non ruotate in direzione normale alla faglia. Tuttavia, le componenti FP delle stazioni indicate come impulsive mostrano un andamento dei rapporti tra domanda inelastica ed elastica simile a quelli per le componenti FN.

In conclusione, le 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. Questi, sebbene siano noti all'ingegneria sismica e alla sismologia da molto tempo, sono stati solo recentemente approfonditi in modo da poter essere inclusi nelle analisi di pericolosità sismica e quindi nella determinazione delle azioni di progetto, sebbene ciò richieda una conoscenza relativamente dettagliata delle faglie di interesse.

## BIBLIOGRAFIA

- Baker, J.W. (2007) Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions Using Wavelet Analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(5), 1486-1501.
- Chioccarelli E., Iervolino I. (2010) Near-Source Seismic Demand and Pulse-Like Records: a Discussion for L'Aquila Earthquake. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. doi: 10.1002/eqe.987 (in stampa)
- Iervolino, I., Cornell, C.A. (2008) Probability of Occurrence of Velocity Pulses in Near-Source Ground Motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(5), 2262-2277.
- 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(1), 199-122.