



Progetto S5_ - Definizione dell'input sismico sulla base degli spostamenti attesi
Responsabili: Ezio Faccioli (Politecnico di Milano) e Antonio Rovelli (INGV Roma)

Relazione sulla prima fase di attività (1 giugno 2005 - 30 giugno 2006)

INDICE

1. Obiettivi e struttura del progetto	2
2. Avanzamento generale del progetto: risultati principali	2
2.1 Considerazioni d'insieme	2
2.2 Risultati principali	3
3. Stato di avanzamento del progetto: aspetti specifici	9
3.1 Completamento e caratteristiche della base dati mondiale, trattamento dati, elaborazioni, degli SRS, relazioni di attenuazione, e correlazioni semiempiriche (Task 1, 4a e 4c)	9
3.2 Perfezionamento e integrazione del modello di riferimento	15
3.3 Introduzione di effetti di campo vicino (e del meccanismo di faglia) nel modello di riferimento (Task 3)	16
3.4 Modifiche ad attenuazione e a forma di SRS su grandi bacini sedimentari (Task 5a), e per effetti di bordo in valli e bacini di minori dimensioni (Task 5b)	17
3.5 Influenza di diverse forme di dissipazione sullo SRS (Task 2a)	22
3.6 Spettri di verifica per costruzioni monumentali (Task 2b)	22
3.7 Analisi probabilistiche, saggi di rappresentazione della pericolosità sismica in SRS	24
4. Eventuali difficoltà maggiori, modifiche di indirizzo, valutazione dell'attività delle UR, interazione con DPC	25
5. Stato di avanzamento dei singoli deliverables (DL)	26
6. Fattibilità delle attività previste per il secondo anno: previsioni, aggiustamenti dei DL, esigenze	27
7. Riferimenti bibliografici	29
8. Tabelle finanziarie riepilogative	30



Progetto S5_ - Definizione dell'input sismico sulla base degli spostamenti attesi

Responsabili: Ezio Faccioli (Politecnico di Milano) e Antonio Rovelli (INGV Roma)

Rendiconto prima fase di attività (1 giugno 2005 - 30 giugno 2006)

1. Obiettivi e struttura del progetto

Scopo del progetto è la definizione di un modello dell'azione sismica come spettro di risposta elastico di spostamento (SRS) adatto per la normativa sismica, e la creazione di mappe di pericolosità in termini di spostamento spettrale. I sottoprogetti (Tasks), con i rispettivi obiettivi del 1° anno, sono:

1. Perfezionamento ed integrazioni del modello iniziale di riferimento per lo SRS (FPR04, Faccioli et al. 2004). *1° anno*: Conferma/modifica del modello: eventuale formulazione di ipotesi di modello aggiornato
2. (a) Valutazione dell'influenza di diverse forme di dissipazione sullo SRS.
1° anno: Quantificazione fattori riduzione dello SRS, in funzione di duttilità e periodo di vibrazione;
(b) Definizione di spettri di verifica per costruzioni monumentali.
1° anno: Modello dinamico non lineare per la risposta sismica di macroelementi rappresentativi di porzioni di edificio monumentale, e calibrazione di metodi normativi semplificati.
3. Introduzione di effetti *near-field* (e del meccanismo di faglia) nel modello di riferimento
1° anno: Formulazione quantitativa (di limite superiore), applicabile a relazioni di attenuazione, di modifiche a SRS di riferimento per meccanismo di faglia.
4. Attenuazione dello spostamento su basi osservazionali
1° anno: (a) Prima uscita delle relazioni di attenuazione finali per spostamento di picco del suolo; (b) Per Trentino: quadro attività rete accelerometrica, e ipotesi su modelli di attenuazione weak motion; (c) Correlazioni (intensità-spostamento) a base semiempirica.
5. Attenuazione dello spostamento – modellazioni numeriche di effetti amplificativi di SRS in bacini sedimentari
1° anno: (a) Modelli attenuazione numerica grandi strutture geologiche (pianura Padana); (b) Formulazione di eventuali modifiche ad attenuazione d_{max} (e a forma di SRS) per effetti di bordo in valli e bacini sedimentari – prima uscita.
6. Mappe di pericolosità.
1° anno: Analisi parametriche preliminari su carte di pericolosità in spostamento spettrale, e integrazioni prime uscite da altri tasks per valutare i loro effetti, in particolare per campo vicino e importanti bacini sedimentari.

2. Avanzamento generale del progetto: risultati principali

2.1 Considerazioni d'insieme

I risultati della 1° fase confermano la bontà dell'impostazione iniziale del progetto e la fattibilità degli obiettivi, in particolare, per gli aspetti di sismologia applicata all'ingegneria:

- possibilità di definire la pericolosità mediante una rappresentazione semplificata dello SRS, ancorata ad un solo parametro di lungo periodo (invece dell'approccio puramente empirico di SRS a pericolosità costante, che richiede in teoria una mappa per ogni ordinata spettrale considerata)
- modello iniziale di riferimento (FPR04): *a.* sostanziale allargamento della base dati mondiale e conseguente robusto appoggio alla rappresentazione semplificata di cui sopra, *b.* introduzione della componente verticale, prima mancante
- messa a fuoco realistica dell'incidenza degli effetti di meccanismo di sorgente e di campo vicino (*near field*), sfruttando la qualità e rappresentatività statistica della base dati mondiale
- possibilità di parametrizzare ai fini dello SRS gli effetti di amplificazione su valli e bacini sedimentari legati alla generazione di onde di superficie
- saggi già significativi di rappresentazione di carta di pericolosità per 2 diverse regioni italiane.



Per gli aspetti maggiormente legati al modello ingegneristico di azione sismica in spostamento, si è:

- approfondito l'approccio basato sugli spettri sovrasmorzati, allo scopo di definire una relazione tra smorzamento viscoso equivalente e periodo, duttilità e tipologia strutturale
- sperimentato in forma già avanzata un approccio di tipo "normativo" semplificato di verifica delle costruzioni monumentali.

2.2 Risultati principali

2.2.1 Conferma/perfezionamento del modello di riferimento dello SRS (Task 1), relazione di attenuazione (Task 4) e applicazione alle mappe di pericolosità (Task 6).

Si sono completati l'assemblaggio della base dati mondiale di registrazioni *strong motion* digitali, includendo anche la componente verticale e la correzione di linea base di tutti i dati, e si sono eseguite le elaborazioni sugli spettri di risposta. Rispetto al punto di partenza (FPR04), si sono aggiunte le registrazioni di terremoti significativi recenti ($M_w \geq 5.0$), dal 1996 fino al 2005, riconducendo tutte le magnitudo a M_w . Le registrazioni si riferiscono a differenti categorie di suolo (v. Cap. 2), per distanze ipocentrali $0 < R_i \leq 150$ km e $5.0 \leq M_w \leq 7.2$; questi intervalli sono stati definiti in base ad analisi preliminari di pericolosità per disaggregazione su alcune regioni italiane. Onde avere classi di magnitudo e distanza omogenee per l'elaborazione delle forme spettrali mediane sono state selezionate 1399 registrazioni (Tab. 2), contro le 253 di FPR04; le stesse registrazioni, con l'aggiunta di ulteriori 186, si sono usate per ricavare la relazione di attenuazione di $D_{10} = \text{SRS}(10\text{s})$, parametro di ancoraggio dello SRS a lungo periodo, assunto uguale allo spostamento di picco del suolo, d_{max} , nel predetto intervallo di magnitudo. D_{10} è definito come *media geometrica* degli SRS a 10s delle due componenti orizzontali, ovvero

$$D_{10} = [\text{SRS}_x(10\text{s}) \times \text{SRS}_y(10\text{s})]^{1/2}. \quad (1)$$

Per calcolare gli SRS fino a 10 s e oltre è stata messa a punto una procedura di correzione della linea base degli accelerogrammi (codificata nel programma Matlab basco.m), basato sul raddrizzamento a tratti della linea base della velocità, ottenuta integrando l'accelerogramma non corretto.

Dai valori di D_{10} della base dati mondiale si sono ottenute, mediante regressione lineare a due stadi (v. Joyner e Boore 1981), le seguenti relazioni di attenuazione

- tenendo conto delle condizioni di sito, v. Cap. 3:

$$\log D_{10} = -4.31 + 1.04 M_w - 1.04 \log_{10} R_i + 0.10 S_1 + 0.23 S_2 \quad \sigma_{\log D_{10}} = 0.27 \quad (2)$$

- senza distinzioni di sito

$$\log D_{10} = -4.12 + 1.02 M_w - 1.06 \log_{10} R_i \quad \sigma_{\log D_{10}} = 0.28. \quad (3)$$

Le (2) e (3) risultano in sorprendente accordo con la relazione "teorica" per lo spostamento max del suolo derivata in FRP04 dal modello di Brune (per caduta di sforzo "media" $\Delta\sigma = 3$ MPa); esse confermano che D_{10} , almeno fino a $M_w 7.0$ circa, si attenua con la distanza focale R_i con legge molto prossima a quella delle onde di volume.

Per quanto riguarda i terremoti italiani, sono state analizzate 254 registrazioni digitali di componenti orizzontali relative a 17 terremoti con $4.0 < M_w < 6.0$, costituite per il 90% da accelerogrammi della RAN (Servizio Sismico) ed il 10% da velocigrammi (registrati da sismometri a banda larga Trillium 40 s) della rete nazionale dell'INGV. Considerando le basse magnitudo analizzate, il problema dell'effetto del processamento diventa più critico rispetto ai dati della base mondiale poiché il rapporto segnale/rumore tende a diminuire. Per quantificare la variabilità introdotta dal processamento si sono applicati quattro diversi metodi di correzione della linea base e successiva integrazione (doppia o semplice), includendo quella sopra citata (programma basco.m) che hanno messo in evidenza come la variabilità dei valori di D_{10} calcolati con le diverse metodologie sia dell'ordine del 15% a fronte di una dispersione intrinseca del D_{10} pari al 45% circa (derivante soprattutto dalla differenza dei valori nelle due componenti orizzontali di una stessa registrazione). E' da sottolineare che per i dati mondiali, caratterizzati da rapporto S/N a lungo periodo nettamente superiore a quello dei dati italiani,



la variabilità dovuta al procedimento di correzione è sicuramente inferiore al 15%. Infine, nonostante i tentativi compiuti, non è stato possibile acquisire registrazioni simultanee di accelerometri *strong motion* e velocimetri *broadband* in una stessa postazione per scosse significative, che permetterebbero di valutare per confronto gli errori introdotti dal metodo di correzione.

La dipendenza da distanza focale e M_w dei valori di D_{10} dalle registrazioni digitali italiane, per quanto queste siano in numero limitato, risulta ben rappresentata dalla (3); quest'ultima, assieme alla (2) è stata pertanto scelta strumento base per i calcoli di pericolosità sul territorio nazionale nel seguito del progetto.

Sono state anche analizzate 70 registrazioni di terremoti dell'Etna con $3.0 < M_w < 4.8$, le cui forme d'onda mostrano leggi di scala nettamente differenti dai terremoti tettonici prima considerati. Per questi eventi emerge una componente di bassa frequenza che, per magnitudo > 4 , può portare incrementi significativi nei valori di spostamento rispetto alla relazione di attenuazione (3) applicabile per il resto dell'Italia. I dati analizzati, nonostante la limitata disponibilità di registrazioni per la zona in questione, evidenziano la necessità di una correzione del tipo

$$\log D_{10} = -4.12 + 1.02 (M_w + m) - 1.06 \log R_i \quad (4)$$

dove, dalla regressione dei dati etnei, m risulta pari a 0.7. Nella seconda fase si cercherà di migliorare ulteriormente l'aggiustamento introducendo, se possibile, una correzione anche nel termine dipendente dalla distanza.

Le forme spettrali osservate della base dati mondiale, con relativa fascia di dispersione (v. Cap. 3), hanno condotto a formulare un modello di SRS aggiornato e semplificato (rispetto a FPR04): esso ha forma bilineare, linearmente crescente a corto periodo e a valore costante pari a D_{10} a lungo periodo. Il periodo all'intersezione dei due tratti, T_D , è lo stesso introdotto nell'Eurocodice 8 – Parte 1 (CEN 2004), ma, anziché essere costante e pari a 2s per moto orizzontale, esso è lasciato libero di variare in funzione di M_w e R_i . La scelta cruciale dell'ordinata SRS a 10 s come valore di ancoraggio dello spettro è supportata dalle forme spettrali osservate, che mostrano valori di $T_D < 10$ s per $M_w \leq 7+$. Per $T \leq T_D$, lo SRS è ottenuto, salvo successive verifiche più approfondite, applicando la relazione pseudospettrale $SRS = S_A/\omega^2$ allo spettro di accelerazione S_A dell'Eurocodice 8 (CEN 2004) nell'intervallo $T_C \leq T \leq T_D$ ed è governato dal valore dell'accelerazione di riferimento a_g .

Per le mappe di pericolosità, un primo risultato si è ottenuto individuando, mediante analisi probabilistiche¹ per disaggregazione in molti siti rappresentativi, gli intervalli di M_w e R_i di definizione della relazione di attenuazione (3) per l'applicazione al territorio italiano. Un secondo importante risultato si è raggiunto rappresentando la pericolosità con il modello di SRS bilineare testé introdotto, onde verificare in via preliminare l'applicabilità del modello stesso, in due passi:

- 1) per un dato sito e un periodo di ritorno prescelto, mediante analisi probabilistica preliminare disaggregata su D_{10} , si è individuata la coppia M, R_i che domina la pericolosità in spostamento;
- 2) si è poi condotta un'analisi probabilistica² in accelerazione di picco [usando Ambraseys et al. (1996), modificata per distanze epicentrali come in Montaldo et al. (2005)] e una in spostamento con la relazione di attenuazione (3), onde individuare rispettivamente i valori di a_g e D_{10} .

Con i risultati del passo 2) si è costruito per ogni sito lo SRS bilineare e lo si è successivamente confrontato con la forma spettrale media osservata (Task 1) per le classi di magnitudo e distanza contenenti la coppia dominante ottenuta nel passo 1) per il sito in esame. Questo primo studio di applicabilità del modello SRS aggiornato è stato condotto per due regioni sismicamente assai diverse: Arco Calabro e Alpi Occidentali. Esso ha fornito risultati assai confortanti (v. Cap. 3), mostrando che gli spettri SRS bilineari forniti dall'analisi probabilistica testé descritta sono quasi sempre compresi nella fascia di dispersione degli spettri mediani osservati a scala mondiale.

2.2.2 Effetti di campo vicino (e del meccanismo di faglia) nel modello di riferimento (Task 3)

L'approccio a questo aspetto si è venuto precisando nella 1° fase attraverso le considerazioni seguenti:

1. Essendo il modello SRS di riferimento deterministico, anche le modifiche necessarie per

¹ Con processo poissoniano degli eventi e dati delle ZS come da Gruppo di Lavoro (2004).

² Con il programma di calcolo CRISIS2003 (Ordaz et al. 1991).



introdurvi gli effetti di direttività e del meccanismo di faglia devono essere di tipo deterministico: si è optato di quantificarle sulla scorta di simulazioni numeriche, dando loro forma analitica;

2. Anche disponendo di una buona conoscenza della geometria delle singole faglie sismogenetiche e delle loro modalità di rilascio di energia in caso di terremoto (conoscenza quasi sempre mancante in Italia), appare arduo dal punto vista analitico e oltremodo oneroso dal punto di vista computazionale introdurre nel calcolo probabilistico gli effetti in esame; i pochissimi esempi con presa in conto esplicita della direttività riguardano calcoli di pericolosità per un solo sito in presenza di una sola faglia sismogenetica;
3. Se i dati di calibrazione della relazione di attenuazione comprendono sottoinsiemi rappresentativi di registrazioni nel campo vicino della sorgente, ben distribuite attorno alla stessa, non appare necessario introdurre nel calcolo probabilistico modificazioni specifiche per tener conto degli effetti in esame, perché essi sono già statisticamente introdotti attraverso la relazione di attenuazione e la sua dispersione (come segnalato dai revisori internazionali nella riunione di Roma del 2005, in particolare dal Prof. M. Ordaz);
4. Gli aggravii apportati da alcune normative recenti (ad es. negli USA) allo spettro di risposta di progetto a periodi medio-lunghi in siti in campo vicino (ad es. componente normale alla faglia predominante su quella parallela) sono tarati per lo più su dati da eventi con $M_w > 6.5$; essi non riguardano peraltro periodi di vibrazione > 5 s. Inoltre, registrazioni vicine alla rottura di faglia in importanti terremoti recenti (Turchia 1999) non evidenziano significativamente gli effetti in questione.

Si è pertanto proceduto a: a) quantificare per via numerica e analitica le modificazioni da apportare al modello di riferimento, in un'ottica di valutazioni di scenario su singole faglie di caratteristiche note, e b) verificare la rappresentatività dei dati di calibrazione sotto il profilo del punto 3.

Per le simulazioni numeriche si è usato un metodo di calcolo in campo completo e sorgente estesa (Spudich e Xu 2003), e un modello con 121 ricevitori (11x11) equidistanti e spaziatissimi di 10 km sulla superficie di un semi-spazio omogeneo, e faglia giacente in uno dei piani di simmetria. In questa prima fase, la magnitudo è stata mantenuta costante e uguale a 6.5 con una caduta di sforzo di 3 MPa (lunghezza di faglia 30 km e larghezza 14 km). La velocità di rilascio di dislocazione è tenuta costante lungo la faglia, con arresto graduale ai bordi per evitare eventuali fasi localizzate. I parametri di discretizzazione assicurano stabilità numerica fino a 0.8 Hz. Sono state effettuate 36 simulazioni facendo variare il meccanismo focale, il punto di nucleazione e il rapporto fra velocità di rottura v_r e velocità v_β delle onde S, per un totale di 13000 sintetici in spostamento. Si è così riusciti a studiare la dipendenza dello spostamento di picco d_{max} e di un parametro, t_0 di durata significativa del moto, dalla direttività e dal meccanismo focale in funzione di distanza dal centro della faglia (r_c) e angolo di vista (θ), cioè l'angolo nel piano orizzontale fra l'azimut della faglia e il vettore sorgente-ricevitore. Le simulazioni non hanno mostrato alcuna tendenza per t_0 evidenziando invece per d_{max} un aumento lineare al diminuire della distanza, in accordo con la (3), e forte variabilità in funzione dell'angolo θ in campo vicino, dovuta a direttività e profilo di radiazione. Si propone quindi di modificare la relazione di attenuazione del parametro di moto di lungo periodo nella forma seguente, da confrontare con la (3):

$$\log(d_{max}) + \log(r_c) = \underbrace{M_w - 4.3}_{\text{Faccioli et al. (2004)}} + a + \underbrace{\log(f_R(\theta))}_{\text{meccanismo focale}} + \underbrace{\log(f_d(\theta, v_{app}, \xi))}_{\text{direttività}} \pm \sigma \quad (5)$$

$$f_d(\theta, v_{app}, \xi) = v_{app} \left[\frac{1}{1 - v_{app} \cos(\theta)} + \frac{\xi}{1 + v_{app} \cos(\theta)} \right] \quad (6)$$

$$v_{app} = b \frac{v_r}{v_\beta}$$

in cui: ξ = parametro che governa il grado di unilateralità nella propagazione della frattura, a e b =



parametri numerici definiti nel Cap. 3 per diversi meccanismi focali il cui valore è stato dedotto dai risultati delle simulazioni numeriche, e σ = dispersione della stima (aggiuntiva rispetto a quella della (3)), compresa tra 0.11 e 0.19, a seconda del meccanismo focale e della componente del moto considerata (orizzontale o verticale). La (5), sviluppata prima della (3), fa ancora uso di d_{max} , anziché D_{10} , e della relazione di attenuazione formulata in FPR04, anziché della stessa (3). Gli aggiustamenti per garantire piena coerenza tra la (3) e la (5), anche per quanto riguarda la misura della distanza, verranno apportati nella 2° fase. La funzione f_R è stata alternativamente posta uguale a $\sin(\theta)$ e $\sin(2\theta)$, con significato evidente.

Quanto alla rappresentatività della base dati mondiale sotto il profilo degli effetti di sorgente, essa è stata sicuramente accertata: si riportano nel capitolo successivo esempi significativi. L'indicazione principale è che per faglie trascorrenti emerge con chiarezza l'effetto del profilo di radiazione SH sulle due componenti orizzontali nella (1), dando luogo a un effetto di compensazione nella media geometrica, mentre per faglie inverse con propagazione unilaterale si manifesta ugualmente forte su entrambe le componenti l'effetto della direttività.

2.2.3 Eventuali modifiche ad attenuazione d_{max} (e a forma di SRS) su grandi bacini sedimentari (Task 5a), e per effetti di bordo in valli e bacini sedimentari (Task 5b).

Per studiare gli effetti di estesi e profondi bacini sedimentari sulla forma degli SRS, come previsto dal Task 5°, sono stati seguiti diversi approcci. Primo, si sono simulati nell'area della Pianura Padana e Veneto-Friulana degli scenari causati da terremoti di magnitudo medio-alta che avvengono in prossimità dei margini di questi bacini. Si è fatto preliminarmente uso di modelli 1D, costruiti sulla base di dati di letteratura per le velocità (Cassano et al., 1986; Doglioni, 1993) e in analogia con il bacino di Los Angeles per il fattore di qualità Q (Olsen et al., 2003). Modelli più sofisticati (3D) saranno utilizzati successivamente. Utilizzando come riferimento la zonazione ZS9 sono state selezionate come zone sorgente la 905 (Friuli-Veneto Orientale), la 906 (Garda-Veronese) e la 915 (Garfagnana-Mugello). Gli scenari sono stati costruiti facendo variare 3 diverse distribuzioni di slip, 12 punti di nucleazione e 2 velocità di rottura, ed i ricevitori sono stati posti sia sul lato del letto (*foot wall*) che del tetto (*hanging wall*) della faglia. Per validazione è stato fatto un confronto tra il risultato degli scenari in stazioni su roccia (V_s del substrato affiorante pari a 2.25 km/s) e le medie degli SRS della base dati mondiale. Questo confronto indica che, soprattutto per distanze superiori ai 75 km, vi è un accordo più che soddisfacente tra simulazioni e dati reali, sia in termini di valori medi che di dispersione. Analizzando gli scenari a diverse distanze all'interno del bacino, l'amplificazione dell'SRS rispetto al corrispettivo su roccia risulta intorno ad un fattore 2 per $T > 7-8$ s per la sorgente Friuli-Veneto Orientale, ma l'effetto del bacino diventa decisamente più marcato, soprattutto a distanze minori di 75 km (fino ad un fattore 4), per scenari del tipo Garda e Garfagnana, con il massimo delle ordinate spettrali a periodi anche maggiori di 10 s. Ciò dipende principalmente dal diverso modello di velocità adottato per la pianura Padana e l'area Veneto-Friulana. L'approssimazione 1D può comunque portare a sovrastimare questi effetti. Converrà attendere l'esito delle simulazioni 3D del secondo anno per modellare definitivamente i termini correttivi.

Si sono poi studiati gli effetti di valli e bacini di piccole e medie dimensioni. Per un riconoscimento oggettivo di tali strutture su scala nazionale si è predisposta una procedura in ambiente GIS. I limiti e la geometria della struttura vengono ricostruiti attraverso l'uso congiunto di un modello digitale (nella fattispecie l'SRTM della NASA)³ e la carta geologica a scala 1:500.000 del Servizio Geologico. Valli e bacini sono riconosciuti come tali quando attraverso questi strumenti informatici si evince che sussistono due condizioni: (i) esiste un'area sufficientemente estesa a pendenza nulla e (ii) affiorano depositi sedimentari. Si è introdotta una nuova classificazione delle unità geologiche definite a questa scala, opportunamente calibrata per la definizione di bacino o valle (detriti, depositi alluvionali e fluviolacustri e fluvioglaciali, spiagge attuali, alluvioni terrazzate (Olocene), depositi eolici (Olocene, Pleistocenici pro-parte)). Per bacini di dimensioni medio-piccole è critica la definizione della

³ <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>



dimensione minima W_{min} di interesse. Infatti, nell'ottica di S5, il periodo d'angolo T_D deve risultare minore del periodo di risonanza 1D (T_{1D}) in corrispondenza dello spessore massimo dei sedimenti (h); T_{1D} segnala infatti in prima approssimazione il limite superiore degli effetti di amplificazione 2D o 3D nei bacini in esame. T_D viene a dipendere dalla sismicità, come descritto in 2.2.1, ed è derivato da analisi probabilistiche, per ogni zona e periodo di ritorno. La lunghezza d'onda λ_D in grado di risentire di effetti legati alla propagazione orizzontale risulta $\lambda_D = T_D * V_S = 4h$. Poiché nella maggior parte dei casi pratici $2h/W \leq 0.25$ (Chávez-García e Faccioli, 2000), ne consegue $W_{min} = 2 (T_D * V_S)$.

Per questi bacini sono state messe a punto e calibrate diverse tecniche numeriche, tutte in approssimazione 2D (differenze finite, elementi finiti, elementi spettrali). Per valli e bacini chiusi viene usato il metodo asintotico dei numeri d'onda di Hisada (1994 e 1995) per il calcolo dello spostamento al bedrock (componente statica e dinamica), che entra come input del modello locale sotto forma di forza efficace al contorno. Il problema numerico è risolto mediante un codice (Else) ad elementi spettrali. Per la taratura del metodo si è simulata la risposta di un bacino reale (Gubbio) e sono confrontati i risultati della simulazione numerica con i corrispondenti valori sperimentali. Gli SRS sono stati calcolati in punti (ricevitori) all'interno del bacino e si sono studiate le variazioni rispetto a punti di riferimento su roccia all'esterno del bacino. Analogamente, per i bacini aperti si è predisposta una procedura numerica per studiare in modo parametrico (si variano pendenza del bordo, contrasto di impedenza, spessore del deposito sedimentario) le variazioni di SRS prodotte dalla diffrazione in funzione della distanza dal bordo. Le tecniche usate sono le differenze finite per onde SH e gli elementi finiti per onde P-SV. I risultati preliminari dei due approcci indicano che gli effetti di amplificazione possono essere significativi e che si può superare, nel centro di un bacino, la fascia di dispersione dei dati sperimentali per Classi C e D. Una indicazione importante che emerge è che, nello studio degli SRS, è utile una rappresentazione in funzione del periodo normalizzato al periodo di risonanza 1D di centro valle (T/T_{1D}). Questa permette infatti di vedere in quale intervallo siano da apportare le modifiche allo spettro SRS su suolo rigido in presenza di bacini sedimentari (Chavez-Garcia e Faccioli, 2000). Per $T < T_{1D}$, le modifiche andranno tarate sulla risposta dei diversi tipi di bacino ma dovranno in ogni caso applicarsi solo per $T > T_D$, onde non interferire con lo spettro di accelerazione di normativa.

2.2.4 Valutazione dell'influenza di diverse forme di dissipazione sullo SRS (Task 2a)

Si sono dapprima riesaminate le formulazioni correnti sulla riduzione delle ordinate SRS nel caso di smorzamento viscoso equivalente (ξ) diverso da 0.05 (v. Bommer e Mendis 2005), per valori fino a 0.30 (appropriati per strutture duttili soggette ad elevate deformazioni plastiche), evidenziando un significativo divario di queste rispetto ai risultati ottenuti, dovuto alle diverse caratteristiche delle azioni sismiche considerate nelle formulazioni disponibili. Di qui la necessità di un approfondito studio parametrico con azioni sismiche di diverse caratteristiche. Si sono anche riesaminati i valori di ξ delle formulazioni esistenti, analizzando un ampio numero di equazioni di letteratura, e ottenendo differenze significative. Ciò ha reso evidente anche la necessità di uno studio parametrico ugualmente approfondito sui valori di ξ appropriati per differenti tipologie strutturali, di diversa rigidità e capacità di spostamento.

Successivamente, si è condotto un esteso studio parametrico sulla risposta dinamica di diversi sistemi strutturali non lineari, allo scopo di stabilire una relazione tra ξ equivalente, periodo di vibrazione, duttilità e tipologia strutturale. A causa delle migliaia di analisi richieste, sono stati adottati modelli a 1 GDL per descrivere la risposta di sistemi strutturali reali, usando 6 modelli costitutivi per rappresentare il comportamento non lineare, e adottando un procedimento iterativo per identificare il valore di ξ equivalente per assegnato livello di duttilità e legame costitutivo. Come primo passo, si sono impiegati accelerogrammi spettro-compatibili, per eliminare la variabilità ottenuta con accelerogrammi reali.

Le equazioni ottenute per quantificare il valore di ξ equivalente ($\xi_{effective}$), necessario per la riduzione dello SRS, in funzione della duttilità μ e del periodo T della struttura sono:



$$\xi_{effective} = \frac{a}{\pi} \cdot \left(1 - \frac{1}{\mu^b} - 0.1 \cdot r \cdot \mu\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{(T+c)^d}\right) \cdot \frac{1}{N}, \quad N = 1 + \frac{1}{(0.5+c)^d} \quad (\text{sistema bilineare}) \quad (7)$$

$$\xi_{effective} = \frac{a}{\pi} \cdot \left(1 - \frac{1}{\mu^b}\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{(T+c)^d}\right) \cdot \frac{1}{N}, \quad N = 1 + \frac{1}{(0.5+c)^d} \quad (\text{tutti gli altri sistemi}) \quad (8)$$

Tabella 1. Valori delle costanti nelle (7) e (8) per diversi modelli strutturali non lineari

Costante	Takeda “snello”	Takeda “tozzo”	Bilineare	EPP	Ramberg Osgood	Ring Spring
<i>a</i>	95	130	160	140	150	50
<i>b</i>	0.5	0.5	0.5	0.5	0.45	0.5
<i>c</i>	0.85	0.85	0.85	0.85	1	1
<i>d</i>	4	4	4	2	4	3

Si sono inoltre avviate in anticipo alcune attività previste per la seconda fase, quali:

1. Verifica delle equazioni per strutture a molti gradi di libertà (MGDL), incluso edifici con comportamento degradante in rigidezza e resistenza, per vedere se le precedenti equazioni, derivate da sistemi a 1 GDL, applicate a strutture realistiche (telai in CA a MGDL), portano a risultati accettabili. Sono stati considerati modelli diversi di edifici multi-piano, ed eseguiti confronti tra lo spostamento ottenuto da analisi dinamiche non-lineari rigorose con quello di un oscillatore sovrasmorzato a 1 GDL (equazioni sopra). Il valor medio del rapporto (1GDL/MGDL) si è verificato essere leggermente cautelativo: pertanto si sono ritenute applicabili le (7) e (8) a strutture MGDL, anche a comportamento degradante post-picco.
2. Verifica delle equazioni proposte per accelerogrammi reali [nuovo Task]. Poiché le equazioni sono state derivate da risultati ottenuti con accelerogrammi artificiali, diventa necessario verificare la loro validità per accelerogrammi reali, tra cui diversi sono rappresentativi della sismicità in Italia. La bontà delle equazioni è valutata tramite il parametro DR (*displacement ratio*), rapporto tra lo spostamento ottenuto da un'analisi dinamica non-lineare della struttura (valore “esatto”) e quello predetto con lo SRS ridotto per mezzo delle equazioni proposte (valore approssimato, semplificato), come illustrato nel Cap. 3. Pur essendo i valori medi di DR prossimi all'unità, essi sono affetti da forte dispersione, che non è stato ancora possibile interpretare od eliminare. La verifica verrà quindi ulteriormente approfondita.
3. Estensione dei risultati ottenuti (che mirano alla definizione di SRS sovra-smorzati) a SRS anelastici [*obiettivo nuovo*]. Per garantire una maggiore generalità dei prodotti di questo progetto, i risultati ottenuti verranno post-processati anche in un'ottica di sviluppo di SRS anelastici, tipicamente impiegati in metodologie di progettazione diverse dal *Direct Displacement-Based Design* (in cui l'input viene definito tramite lo SRS sovra-smorzato).

2.2.5 Spettri di verifica per le costruzioni monumentali (Task 2b)

Il danno ed il collasso sismico nelle costruzioni monumentali si sviluppano prevalentemente in forma di meccanismi locali, evidenziando dei “macroelementi” (Doglioni et al., 1994) con comportamento tipo corpo rigido in gran parte autonomo rispetto al resto della struttura. L'estensione alle costruzioni in questione dei criteri di verifica applicabili agli edifici ordinari per i meccanismi locali richiede ancora molti approfondimenti. A tale fine, la 1° fase la ricerca si è concentrata sulla messa a punto di un modello dinamico non lineare atto a descrivere la risposta sismica di un macroelemento



rappresentativo, eseguendo molte analisi dinamiche al passo su sistemi non lineari a 1 GDL con diversi accelerogrammi di eccitazione, allo scopo di formulare metodi “normativi” semplificati. Il modello usato (Housner 1963) ha comportamento elastico non lineare, con ramo *softening*, e dissipazione di energia introdotta con un fattore di smorzamento viscoso equivalente. Per i parametri rappresentativi si sono identificati valori plausibili per meccanismi di ribaltamento delle facciate, e si sono usati come eccitazione sia accelerogrammi registrati che artificiali (compatibili con spettro EC8). Il metodo semplificato usa l’approccio cinematico non lineare per descrivere le curve di capacità e gli spettri elastici “sovrasmorzati” per rappresentare la domanda del terremoto: la prestazione della struttura, in termini di spostamenti, è ottenuta dal loro confronto. Per validare il metodo, questi valori sono stati confrontati con lo spostamento massimo e la corrispondente accelerazione ottenuti dalle analisi dinamiche non lineari.

Con gli accelerogrammi artificiali, la previsione del metodo semplificato a periodi medio-lunghi (> 2s) è risultata in perfetto accordo con le analisi dinamiche non lineari. Con gli accelerogrammi reali, se lo SRS ha valori elevati a periodi prossimi a quello di massima risposta del macroelemento, il metodo semplificato sovrastima la risposta dell’analisi dinamica mentre si osserva una sottosima quando lo SRS in concomitanza al suddetto periodo è più basso rispetto ai valori di periodo immediatamente inferiori. Per un SRS privo di picchi o gole significative, il metodo semplificato fornisce buoni risultati. Non è stato ancora possibile correlare questo fatto con grandezze significative dell’input (intensità di Arias, magnitudo, ecc.), e la verifica si sta approfondendo in questo senso.

Si è anche notato come per la maggioranza delle registrazioni reali considerate, gli SRS ridotti con fattori di riduzione (Bommer e Mendis 2005) sovrastimino, ai lunghi periodi, quelli derivati dalle analisi nel dominio del tempo, soprattutto per valori elevati di smorzamento equivalente. Nella ricerca si è usato il fattore di riduzione dell’EC8 (CEN 2004).

3. Stato di avanzamento del progetto: aspetti specifici

3.1 Completamento e caratteristiche della base dati mondiale, trattamento dati, elaborazioni degli SRS, relazioni di attenuazione, e correlazioni semiempiriche (Task 1, 4a e 4c)

La composizione della base di dati usata per le elaborazioni delle forme spettrali, consistente in 1399 registrazioni accelerometriche digitali a tre componenti, è riportata nella seguente Tab. 2 per classi di M_w , di distanza, e di provenienza geografica. Come già detto in 2.2.1, per ricavare la relazione di attenuazione per D_{10} si sono aggiunte alle precedenti 186 ulteriori registrazioni. La distribuzione magnitudo-distanza di questa base “allargata” è illustrata nella Fig. 1. Sono stati rigorosamente esclusi dati da terremoti di subduzione e con profondità focali > 25 km.

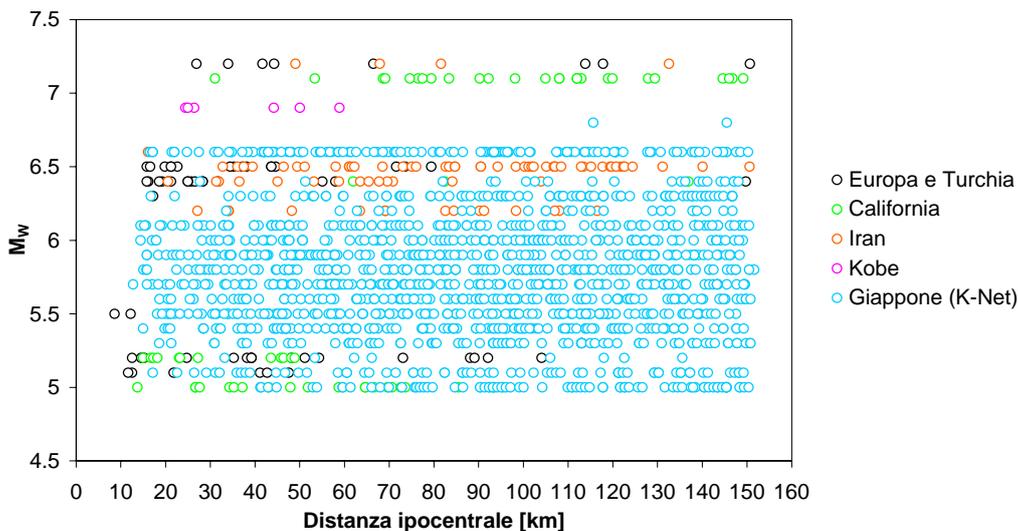


Figura 1 - Distribuzione dei valori di D10 in termini di magnitudo, distanza ipocentrale (R_i), e provenienza.



Per scegliere il metodo più adatto di correzione della linea base sono stati applicati quattro diversi procedimenti ad un insieme selezionato di 53 registrazioni (non corrette), provenienti da regioni geografiche e sismotettoniche differenti (Europa, Medio-Oriente, Stati Uniti, Giappone, Taiwan e Messico), relative a differenti condizioni di sito e su un intervallo di distanze epicentrali da 0 a 50 km. Per ciascuna di esse si sono considerate le due componenti orizzontali e quella verticale, individuando come "ottimali" le registrazioni i cui SRS non presentano una dipendenza importante dal procedimento di correzione. Da tali analisi è emerso che: (i) i migliori insiemi di dati sono quelli delle reti KNet e KikNet giapponesi (che da soli costituiscono l'86% della base dati) e di Taiwan, (ii) che i dati islandesi, turchi, iraniani e USA risultano comunque utilizzabili fino a 10 s con errori molto modesti, ed infine (iii) che scarti più significativi si trovano nei dati italiani, greci e messicani.

Gli effetti di due diversi procedimenti di correzione sono confrontati in Fig.2: la correzione basata sulla finestra pre-evento (implementata nel programma basco.m) può condurre a forme d'onda in spostamento non realistiche ma le derive compaiono a periodi in genere molto superiori a 10 s, valore limite per le applicazioni di interesse di questo progetto. Pertanto questa correzione, facilmente automatizzabile per il trattamento di moli cospicue di dati accelerometrici, è stata usata su tutta la base di dati mondiale (nonché sul sottoinsieme delle registrazioni italiane).

Tabella 2. Composizione (n° registrazioni) della base dati mondiali usata per le elaborazioni SRS

M_w	Regione	Totale	10-30 km	30-50 km	50-75 km	75-100 km	100-125 km	125-150 km	
5.0-5.4	Italia	7	336	6	0	1	0	0	0
	Turchia	15		1	8	2	3	1	0
	Giappone	282		13	36	42	62	64	65
	Stati Uniti	32		11	10	7	4	0	0
5.5-5.9	Italia	4	582	3	0	1	0	0	0
	Giappone	578		42	88	116	116	109	107
6.0-6.3	Turchia	1	279	1	0	0	0	0	0
	Iran	21		2	7	3	5	3	1
	Giappone	257		7	27	44	50	67	62
6.4-6.6	Islanda	28	156	14	6	5	1	0	2
	Iran	52		2	8	17	8	14	3
	Giappone	73		9	9	10	11	18	16
	Stati Uniti	3		0	0	1	1	0	1
6.7-7.2	Iran	4	46	0	1	1	1	0	1
	Turchia	8		1	3	1	0	2	1
	Giappone	8		3	1	2	0	1	1
	Stati Uniti	26		0	1	4	7	8	6

Esempi rappresentativi degli SRS (media geometrica dei valori mediani delle componenti orizzontali) ottenuti dalla base mondiale sono mostrati nelle Fig. 3 e 4 per due classi di distanza focale e $5.0 < M_w < 6.6$: si noti come il periodo a cui termina il tratto iniziale crescente dello spettro arrivi a 5-6 s per M_w circa 6.5. Non è stato possibile calcolare gli SRS mediani suddivisi per classi di distanza per $M_w > 6.6$ a causa del numero insufficiente di registrazioni, v. Fig. 1.

Per determinare gli effetti della categoria di suolo (o di sito), si sono usati i soli dati delle reti giapponesi citate, così da disporre di informazioni omogenee sulle condizioni di sito. Si sono adottate le categorie di suolo A,B,C,D delle recenti normative internazionali e italiane.



Si sono classificate le stazioni con i profili stratigrafici di V_S disponibili fino ad una profondità $z < 30m$, formulando in particolare una nuova correlazione $V_{S,30}$ vs. $V_{S,z}$, basata interamente su dati provenienti dalla KikNet, ed ottenendo la suddivisione in Tab. 3. Il problema principale è la (relativa) scarsità di stazioni in classe A ed in classe D, che diventa più marcata quando si distinguono ulteriormente le registrazioni per magnitudo e distanza.

Si sono poi calcolati gli effetti di sito mediante rapporto tra spettri mediani per classi C e D, rispetto alla classe B, per diversi intervalli di magnitudo e distanza, non essendo possibile eseguire la stessa operazione rispetto alla classe A, per carenza di dati. Separatamente si è eseguita una quantificazione per le sole stazioni della rete KikNet, per le quali sono disponibili registrazioni sia in superficie che a profondità variabili tra 100 e 200 m.

Le principali indicazioni emerse sono le seguenti:

- a) gli effetti di sito maggiori si hanno per basse magnitudo e distanze, probabilmente a causa delle minori lunghezze d'onda in gioco;
- b) gli effetti per suolo B sono $< 5\%$ per M 6.6, $< 10\%$ per M 5-5.4, e risulta quindi giustificata l'assimilazione delle classi B e A ai fini di quest'analisi, e delle sue applicazioni;
- c) gli effetti per classe C sono significativi, specie per distanze brevi e magnitudo basse, con fattori di amplificazione variabili tra 1.05 e 1.3;
- d) pur non essendovi dati a sufficienza per la classe D, le analisi suggeriscono effetti molto significativi, con fattori di amplificazione variabili tra 1.5 e 2.3 (o anche maggiori) e dipendenti dalla frequenza.
- e) a parte il caso dei siti D, che richiedono analisi più approfondite, la dipendenza del fattore di amplificazione dal periodo è modesta per $T > 2s$, risultando così giustificata l'introduzione di un fattore di sito indipendente dal periodo;
- f) i risultati sinora ottenuti per la relazione di attenuazione di D_{10} , eq. (2) forniscono un fattore di sito pari a 1.25 per classe C e pari a 2 per classe D, in accordo ragionevole con i risultati sopra riportati, come può vedersi dalla Fig. 5.

Riguardo alla relazione di attenuazione (3) per D_{10} derivata dalla base dati mondiale, i residui (val. osservato/val. predetto) della regressione, pur non mostrando separatamente alcuna tendenza rispetto a M_w e R_i , hanno invece andamento crescente in funzione del valore osservato (Fig. 6), marcato per i dati della classe di magnitudo più elevata (Fig. 7) chiaramente sottostimati dalla relazione. Per approfondire la cause di questo comportamento si è eseguita anche una regressione lineare separata sui soli dati per $6.8 < M_w < 7.2$ e una regressione non lineare su tutti i dati modificando la (3) mediante l'aggiunta ad R_i di un termine $a \exp(bM)$. Dalla Fig. 7 si può constatare come la regressione non lineare, che introduce saturazione per $R_i \rightarrow 0$, non migliora la bontà della predizione, mentre la regressione lineare separata porta ad una attenuazione con la distanza proporzionale a $R_i^{-0.58}$ che indicherebbe un ruolo dominante delle onde di superficie (trascurabile a magnitudo più basse). Si è anche valutata l'influenza di una diversa misura della distanza, adottando per le magnitudo in questione la distanza minima dalla sorgente e modificando conseguentemente la (3). L'analisi del problema è tuttora in corso e sarà ulteriormente approfondita all'inizio della 2° fase. Rimane peraltro pienamente confermata la bontà della (3) almeno fino a $M_w 6.8$.

La relazione (3) dedotta sulla base dei dati mondiali risulta descrivere in modo soddisfacente l'andamento dei dati italiani per D_{10} , considerati nel loro insieme. La Fig. 8 mostra la bontà dell'aggiustamento per i valori di D_{10} nell'intervallo $4 < M_w < 6$, relativi a 127 registrazioni digitali di buona qualità selezionate tra accelerogrammi (90%) e velocigrammi (10%). È interessante osservare che per i terremoti italiani la (3) sembra garantire la sua validità anche per $M_w < 5$, limite inferiore della base dati mondiale (v. Fig. 9). Ciò non sorprende, se si considera che la dipendenza da magnitudo e distanza è esattamente quella prevista dal modello fisico (Brune) di riferimento.

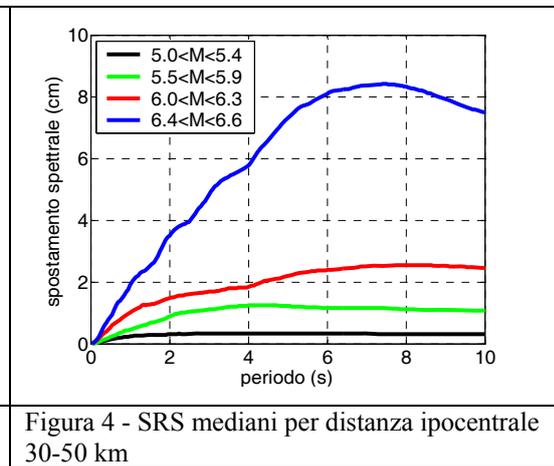
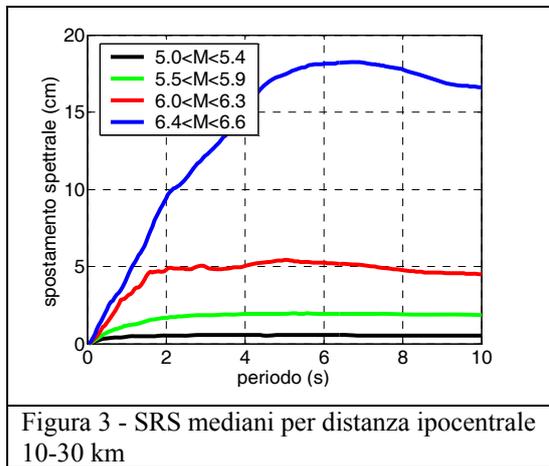
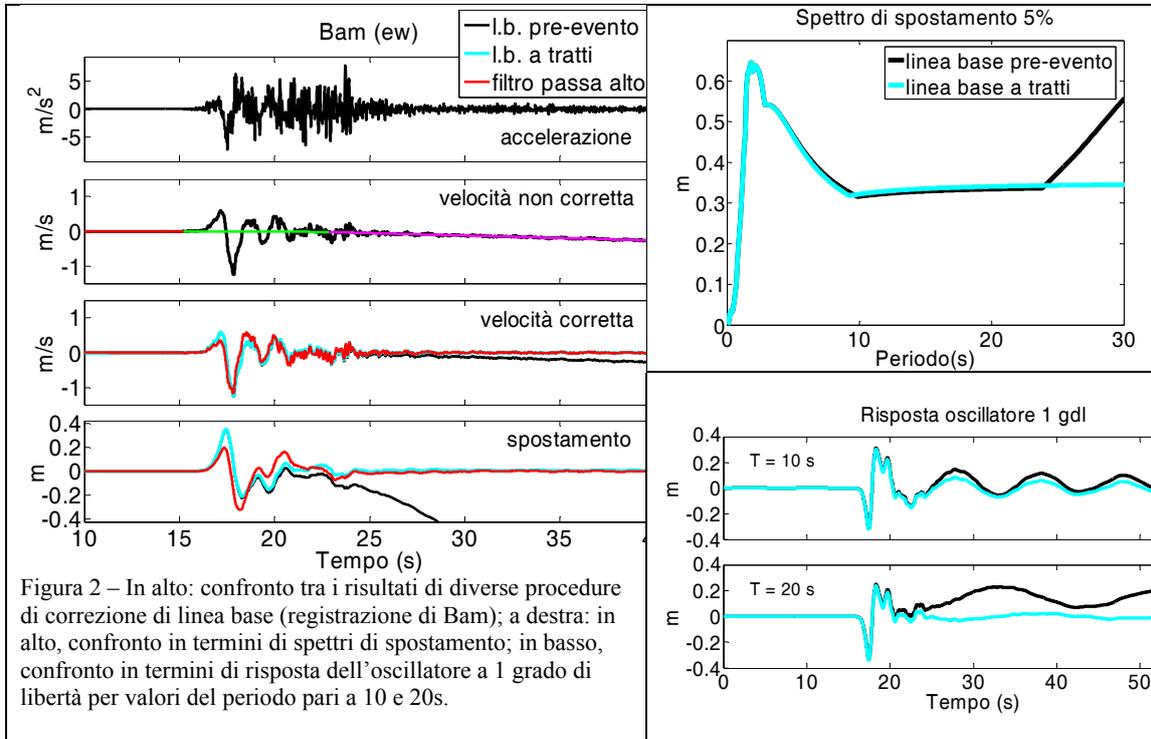
Per i terremoti dell'Etna, si è trovato che la (3) sottostima in modo significativo i valori di D_{10} per $M_w > 4$. Per eventi di magnitudo minore, la mancanza di stime di M_w non ha ancora consentito di ricavare

Tabella 3. Classificazione siti giapponesi KNet e KikNet

Classe	n.stazioni KNet	%	n.stazioni KikNet	%
A	28	2.8	9	8.7
B	458	45.8	61	58.7
C	424	42.4	32	30.8
D	90	9	2	1.9
Tot	1000	100	104	100



regressioni affidabili. Tuttavia sono gli eventi con $M_W > 4$ quelli di maggiore interesse per la pericolosità nell'area etnea. Occorre ricordare che nell'ottobre 2002 terremoti con $4 < M_W < 5$ causarono danni fino al grado VIII EMS, inaspettato per $M_W < 5$ ma che risulta coerente con i valori relativamente elevati di D_{10} calcolati dagli accelerogrammi disponibili (Fig. 10). La correzione dianzi proposta nel Cap.2 (che sostituisce M_W con $M_W + m$ nella (3)) garantisce una buona descrizione dell'andamento di D_{10} per questi eventi (Fig. 10). Il valore ottimale $m = 0.7$ risulta dalla condizione di miglior aggiustamento su 7 accelerogrammi.



Sebbene non relazionato con il modello di riferimento, è tuttavia pertinente al tema dell'attenuazione dei parametri di spostamento a lungo periodo su basi osservative l'argomento delle correlazioni (intensità-spostamento) a base semiempirica, non precedentemente toccato nel Cap. 2, e il cui scopo è appunto quello di produrre relazioni (tarate sull'intensità macrosismica) di "attenuazione" con la distanza dello spostamento "massimo" corrispondente al periodo $T=10$ s negli SRS con 5% di smorzamento. Un primo risultato consiste nell'aver ricavato, sulla base di 79 dati accelerometrici e di intensità del terremoto di Northridge (1994), la seguente correlazione fra spostamenti orizzontali massimi del suolo (d_{max}) ed intensità MMI (stimate da USGS):

$$\log d_{max} = -1.443 + 0.296 MMI \quad R^2=0.66.$$



I valori di d_{max} sono stati ottenuti da accelerogrammi corretti dalle agenzie USC, USGS, DWP, CDMG, registrati a breve distanza dai siti ove sono state stimate cui le intensità. Il lavoro successivamente svolto si è basato su due importanti premesse metodologiche: 1) è preliminarmente necessario verificare l'efficacia dell'algoritmo usato (funzione KF, che tratta solo le onde di volume) in modalità inversa (v. ad es. Pettenati e Sirovich 2003); ovvero, nel caso di terremoti ben osservati strumentalmente e di sorgente nota, che l'algoritmo sia in grado di ritrovare la sorgente, almeno approssimativamente, a partire dalle intensità; 2) che "funzioni" la trasformazione intensità/spostamento, anche con riferimento alle diverse scale di intensità esistenti. Si è così proceduto ad invertire le intensità osservate per i terremoti californiani di Northridge e di Loma Prieta (1989), producendo gli scenari parametrici di spostamento, che sono stati confrontati con gli spostamenti sperimentali forniti da varie agenzie USA. Ne è risultato, pur non essendo il lavoro ancora completato, un accordo ragionevole ma che necessita ancora affinamenti. Come primo caso italiano, è stato considerato il terremoto dell'Irpinia 1980, per il quale è già stata eseguita l'inversione per ritrovare la sorgente, illustrata in Fig. 10 bis. Come si vede, risulta molto buona la concordanza del meccanismo focale, anche se il segmento-intersezione del piano di rottura con la superficie topografica appare troppo spostato verso SW perché l'inversione controlla male la profondità. Si sta elaborando, per via parametrica in modalità diretta, lo scenario in D_{10} .

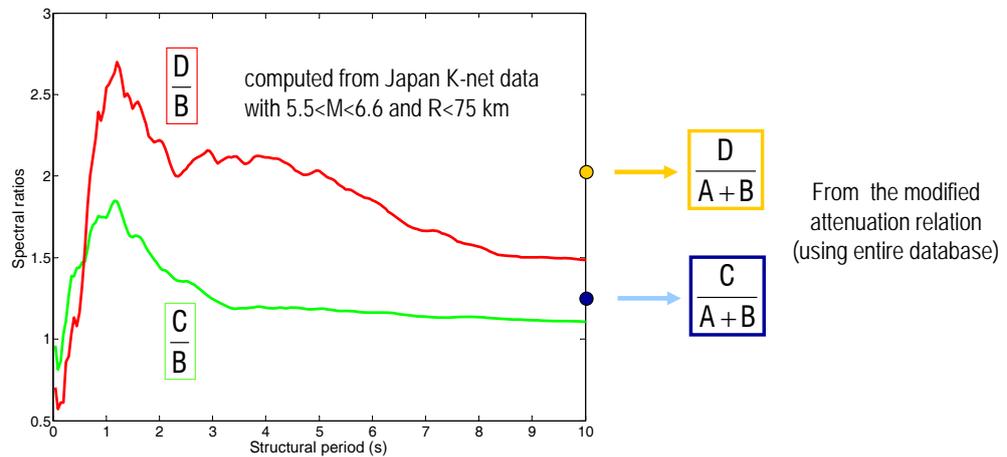


Figura 5 - Influenza della classe di suolo sugli SRS: rapporti di SRS mediani e valori di D_{10} da eq. (2).

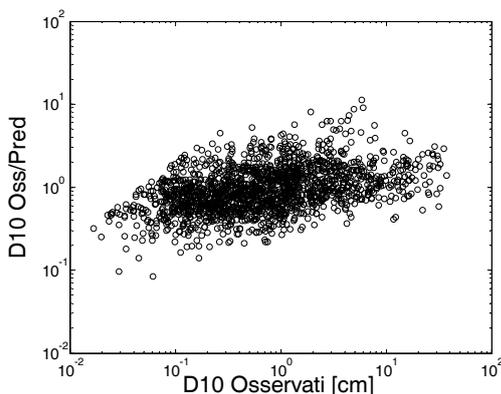


Figura 6 - Residui della relazione di attenuazione (3) per D_{10} in funzione del valore osservato

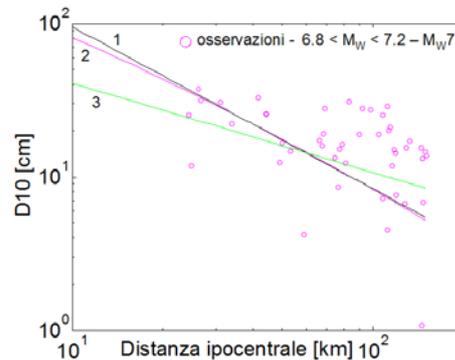


Figura 7 - Aggiustamento della (3) (curva 1, M_w 7.0) alle osservazioni: la curva 2 è la regressione non lineare per M_w 7.0 e la curva 3 la regressione lineare eseguita sui soli dati in figura.

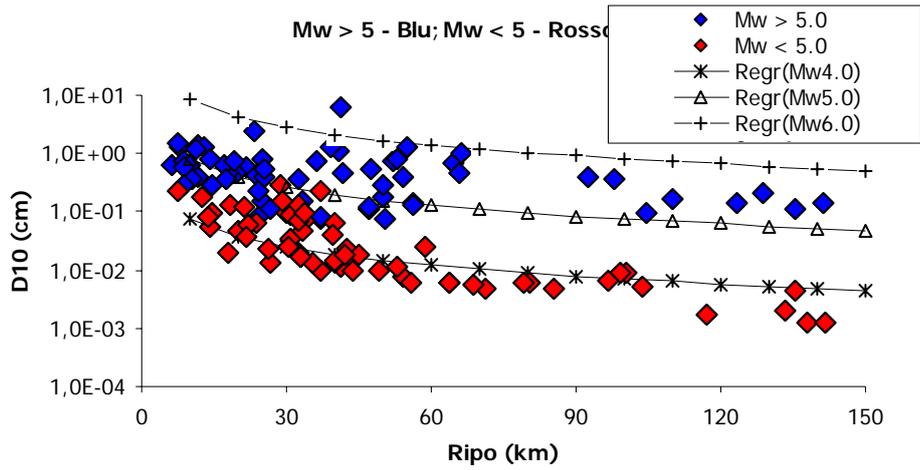


Figura 8. – Distribuzione di D_{10} per i terremoti italiani in funzione della distanza ipocentrale, per classi di magnitudo: le curve “Regr” derivano dalla relazione (3) (dati mondiali).

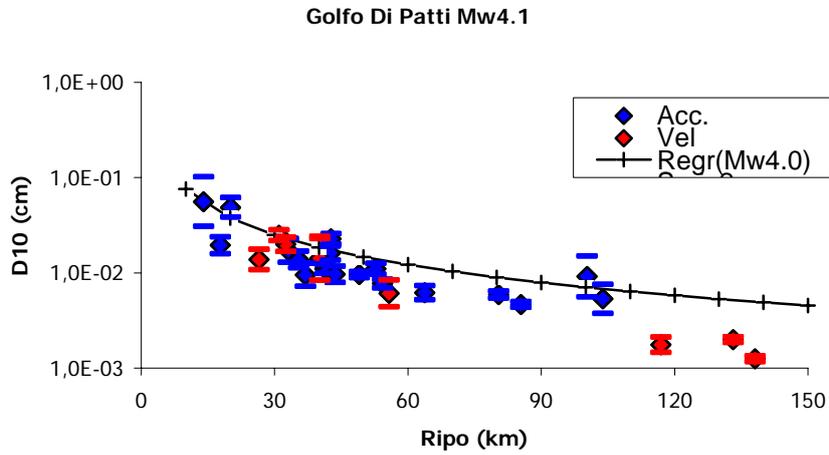


Figura 9 – Attenuazione di D_{10} per un singolo terremoto (Golfo di Patti 2006) ben registrato, confrontata con l’andamento previsto dalla (3).

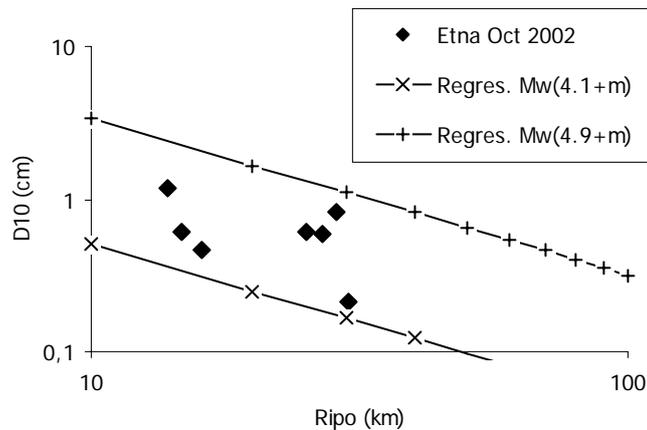


Figura 10 - Valori di D_{10} di terremoti etnei per $M_W > 4$. Le curve discendono dalla (3), con una maggiorazione pari a $m = 0.7$ della magnitudo degli eventi.

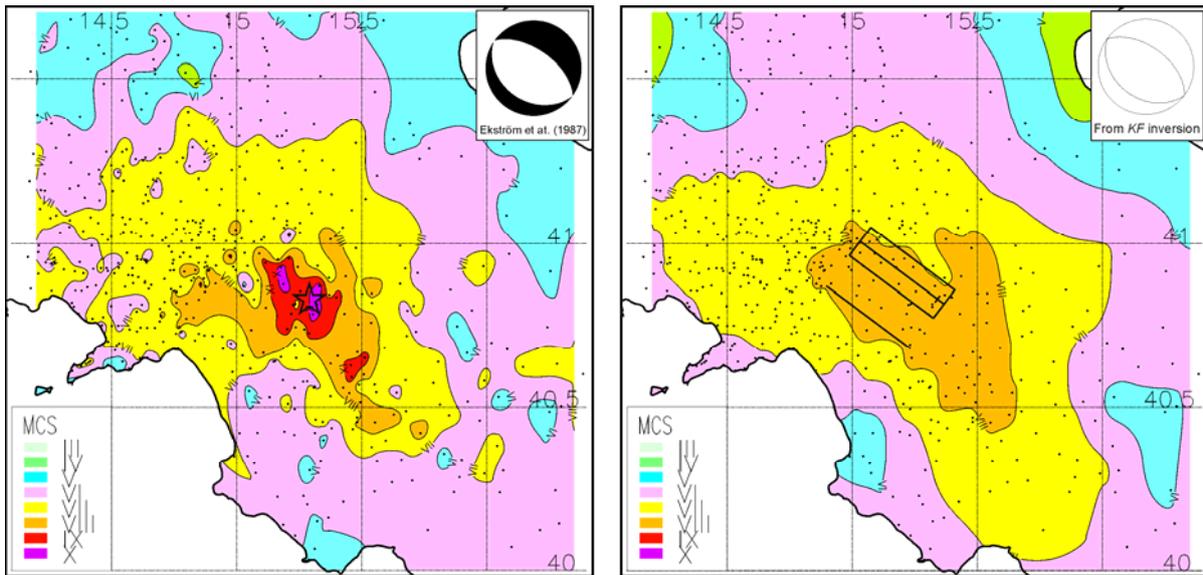


Figura 10 bis – Terremoto dell’Irpinia del 1980. A sinistra: intensità MCS osservate (interpolazione N-N; i punti neri sono i siti esaminati). A destra: intensità sintetiche (metodo KF) del modello a minima varianza trovato automaticamente con algoritmo genetico, con la sorgente determinata per inversione.

3.2 Perfezionamento e integrazione del modello di riferimento (Task 1, continua)

La rappresentazione semplificata bilineare dello SRS, già descritta nel Cap. 2 e proposta come perfezionamento del modello di riferimento FPR04, è illustrata nella Fig. 11 ed espressa dalle formule

$$\begin{aligned}
 \text{per } T < T_C & \quad SRS \text{ è trascurabile} \\
 \text{per } T_C < T < T_D & \quad SRS = a_g \cdot S \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C T}{(2\pi)^2} \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$\text{per } T > T_D \quad SRS = D_{10} \quad (10)$$

dove

- D_{10} è ottenuto dalla (3), o (2), Cap. 2;
- T_D è definito dall’intersezione dei due rami dello SRS (e dipende quindi liberamente da M_w e distanza).

La (9), relativa all’intervallo $T_C < T < T_D$, è tratta dall’Eurocodice 8 – Parte 1 (CEN 2004), e da lì ripresa nelle norme italiane allegate alla OPMC 3431. Mentre i valori di T_C , funzione della classe di suolo, sono quelli fissati dall’Eurocodice, a differenza di quest’ultimo il “periodo d’angolo” T_D non rimane fissato a 2s, ma varierà liberamente sulla base dell’intersezione tra i due segmenti di retta definiti dalle (9) e (10). Anche la stima di $a_g = a_{max}$ (su suolo di classe A) viene eseguita mediante idonee relazioni di attenuazione. In Fig. 12 si confrontano a titolo d’esempio le forme spettrali medie dalla base dati mondiale per la classe di magnitudo 6.4-6.6 ed il corrispondente spettro di riferimento dato dalle (9) e (10). E’ in corso di analisi l’armonizzazione tra i valori del fattore di suolo S applicabili allo spettro di accelerazione, e quelli qui ricavati discussi in 3.1 (v. Fig. 5).

Per quanto riguarda l’integrazione del modello di riferimento, sono state calcolate dai dati mondiali le forme spettrali mediane per la componente verticale del moto (V), calcolando poi i rapporti spettrali V/H. Onde pervenire ad un modello di riferimento anche per le componenti verticali, si sono confrontati in Fig. 12 i rapporti tra gli spettri mediani delle componenti verticali rispetto a quelli orizzontali, per ciascuna delle classi di M_w e per R_i sino a 100 km. Sullo stesso grafico è stato inoltre riportato il corrispondente rapporto tra gli spettri di normativa (OPCM 3431) per la componente verticale (S_{ve}) ed orizzontale (S_e), avendo per la componente verticale considerato $T_D=1s$ (secondo la



normativa), nonché due ipotesi alternative: $T_D = 2s$ (coincidente con quello definito per S_e) e $T_D = 3s$. Quest'ultimo, come mostrato in Fig. 13, fornisce il migliore adattamento ai rapporti V/H osservati, almeno nell'ambito di ipotesi semplici, compatibili le esigenze di normativa. Le elaborazioni statistiche sugli SRS delle componenti verticali delle registrazioni italiane saranno eseguite prossimamente.

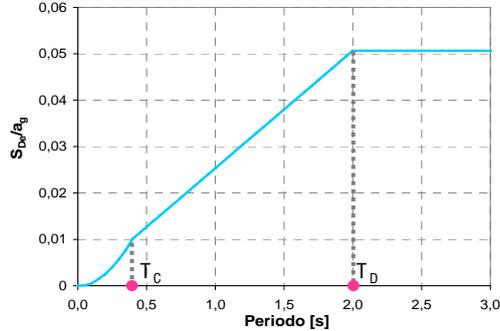


Figura 11 – Modello bilineare dello SRS.

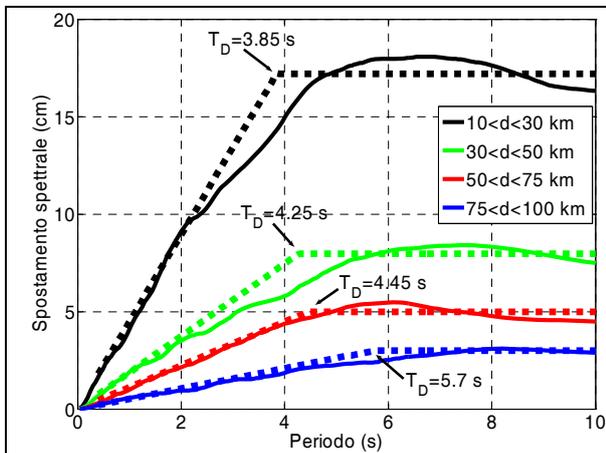


Figura 12 - Ipotesi di modello di riferimento per SRS a confronto con spettri mediani della classe $6.4 \leq M \leq 6.6$.

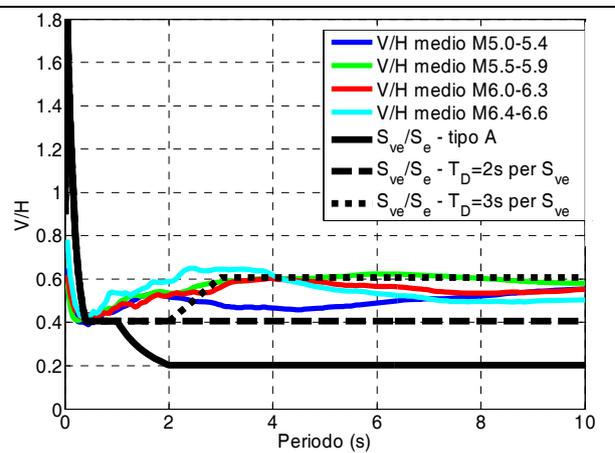


Figura 13 - Rapporti tra gli spettri medi della componente verticale rispetto a quella orizzontale.

3.3 Introduzione di effetti di campo vicino (e del meccanismo di faglia) nel modello di riferimento (Task 3)

Nella (5), il termine correttivo di campo vicino per meccanismi trascorrenti e inversi o normali risulta ben determinato attraverso le simulazioni numeriche: la Fig. 14 mostra l'andamento del 1° membro della (5) nel caso di 12 delle 36 simulazioni effettuate per il meccanismo trascorrente. Ogni riquadro differisce per il valore della velocità di rottura e la posizione del punto di nucleazione. I valori, e le espressioni, di alcuni dei termini che compaiono nelle (5) e (6) sono precisati in Tab. 4.

Tabella 4 – Valori di a, b, della dispersione σ e della funzione f_R nelle (5) e (6)

	Faccioli et al. (2004)		Inserendo meccanismo focale e direttività			
	a	σ	a	b	f_R	σ
Trascorrente (Z)	-0.755	0.27	-0.577	0.708	$\sin(2\theta)$	0.15
Trascorrente (H)	0.038	0.16	0.307	0.475	-	0.11
Normale/inversa (Z)	-0.416	0.30	-0.304	0.942	$\sin(\theta)$	0.19
Come sopra H (hw)	-0.192	0.27	-0.070	0.778	$\sin(\theta)$	0.18
Come sopra H (fw)			0.141			

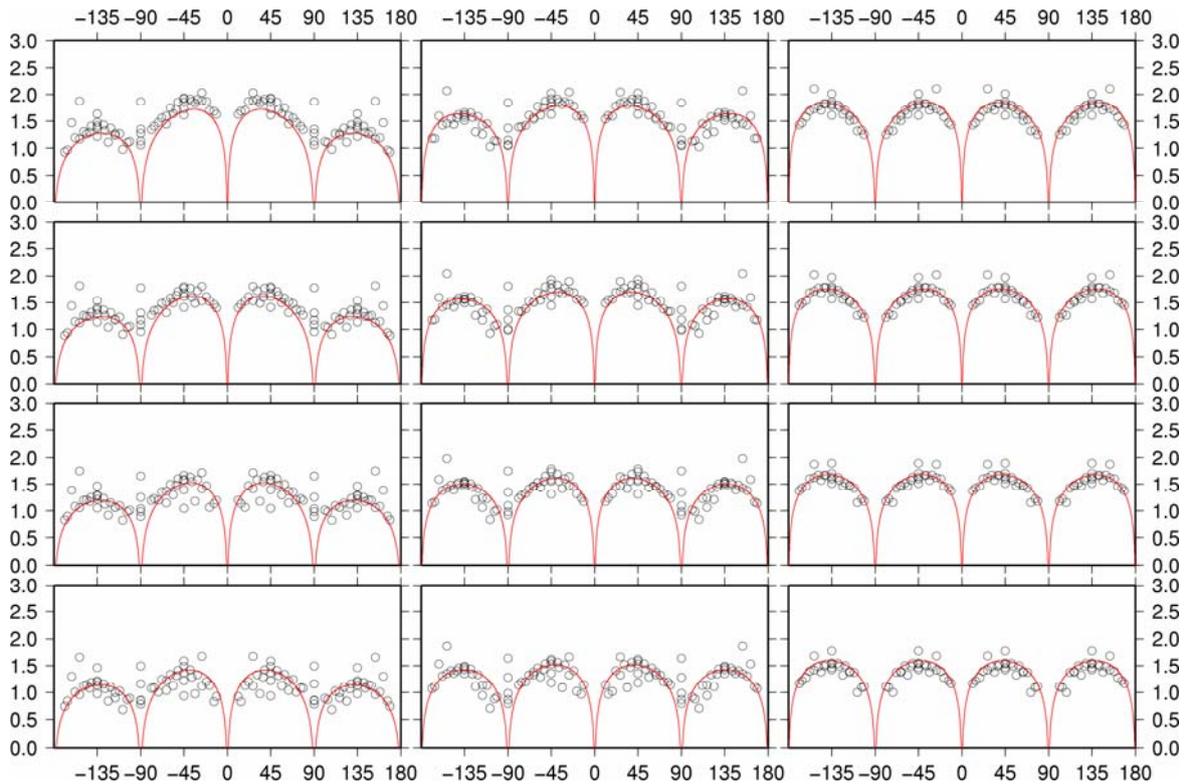


Figura 14 - Variazione di $\log(d_{max}/r_c)$, eq. (5), in funzione dell'angolo di vista θ per meccanismo focale trascorrente, componente verticale. Ogni riquadro corrisponde ad una rottura di faglia particolare. La linea rossa corrisponde all'eq. (5).

Per quanto riguarda il punto 3. in 2.2.2 (rappresentatività della base dati mondiale quanto ad effetti di sorgente e meccanismo di faglia) si è verificato che:

1. I valori di $D_{10} * R_i$ da terremoti giapponesi ben registrati (Tottori 2000, Niigata Chuetsu 2004, Kyushu 2005), nonché da alcuni terremoti islandesi, tutti con M_w prossima a 6.5, mostrano – per gli eventi trascorrenti – un andamento azimutale in accordo con i profili di radiazione teorici per il moto normale (FN) e parallelo (FP) alla faglia, vedansi le Figg. 15 e 16.
2. Per l'evento forte meglio registrato da faglia inversa (Niigata Chuetsu 2004) le componenti FP ed FN hanno andamento del tutto simile e le uniche anomalie nell'andamento azimutale di entrambe sono quasi certamente dovute a suolo di tipo D.
3. Per entrambi i tipi di meccanismo focale (salvo effetti particolari di sito) il valore di $D_{10} * R_i$ calcolato con la media geometrica delle due componenti orizzontali è grosso modo costante.
4. Anche nelle registrazioni più prossime alla sorgente, per le magnitudo esaminate, la componente FN di D_{10} non prevale sulla FP; si verificherà quanto prima se questo vale anche per ordinate SRS a periodo $T < 10$ s.

Tali osservazioni confermano la legittimità della scelta di cui al punto 3, in 2.2.2.

3.4 Modifiche ad attenuazione e a forma di SRS su grandi bacini sedimentari (Task 5a), e per effetti di bordo in valli e bacini di minori dimensioni (Task 5b).

Le variazioni di SRS in presenza di bacini sedimentari di grandi dimensioni in Italia (Task 5a) possono essere significative, in funzione del profilo di velocità crostale (Fig. 17). Si è trovato che gli SRS mediani (con relativa fascia di dispersione) simulati attraverso il modello 1D "rock" di Fig. 17 concordano assai bene con gli SRS mediani dalla base dati mondiale (v. Fig. 3 e 4). La Fig. 18 mostra tuttavia come le variazioni in ampiezza e forma risultino particolarmente ampie nelle regioni in cui lo spessore degli strati con $V_s < 2$ km/s raggiunge i 3-4 km, come in alcuni settori della pianura Padana. In questo caso, negli scenari costruiti con modellazioni 1D, le ordinate spettrali sono, rispetto alla previsione su roccia, più che doppie per $T > T_D$ a distanze dal bordo maggiori di 75 km, spostando

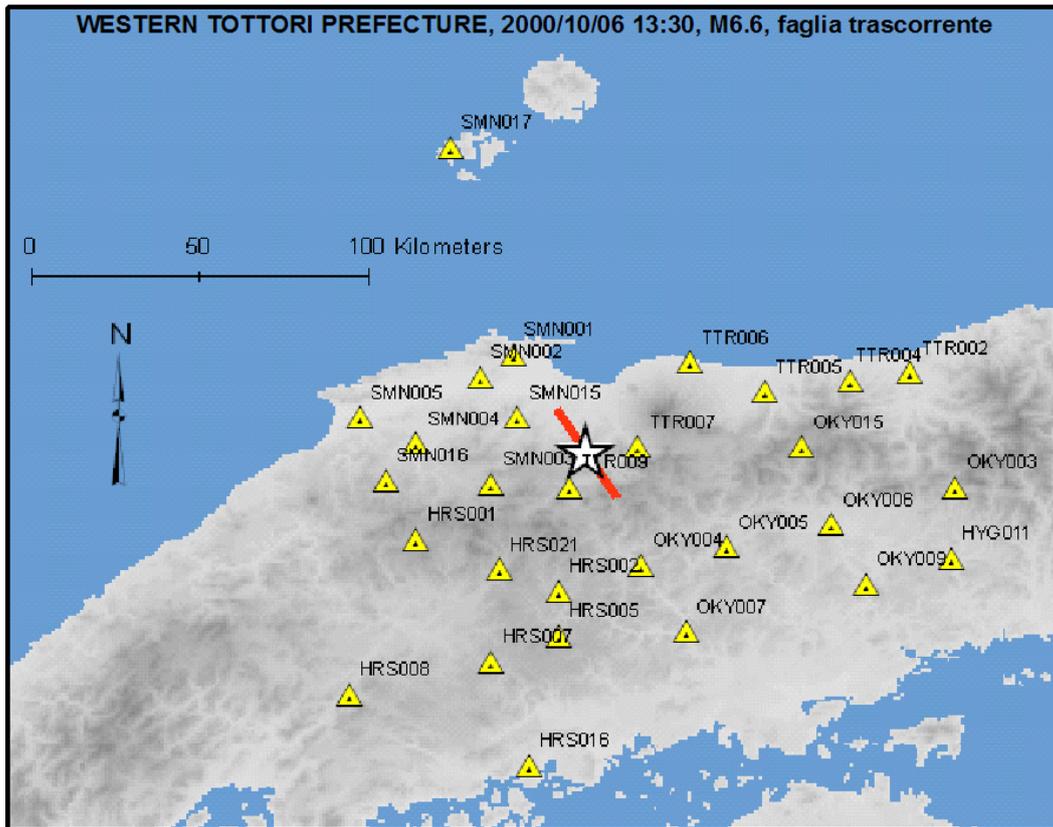


Figura 15 – Epicentro, traccia della faglia generatrice e stazioni accelerometriche per il terremoto di Tottori (Giappone) del 2000.

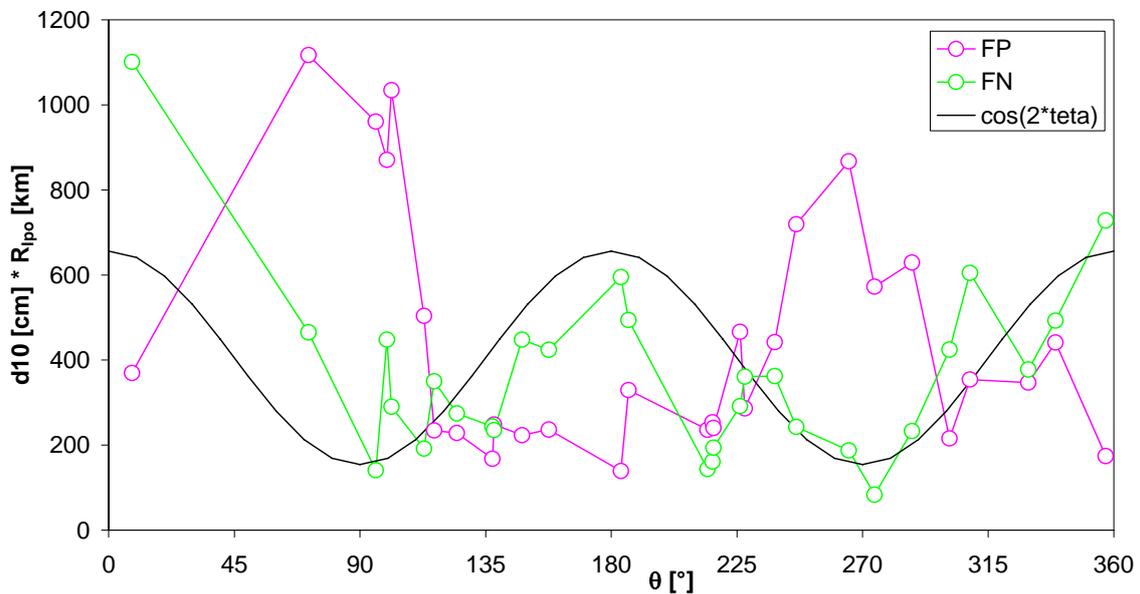


Figura 16 – Terremoto di Tottori (v. Fig. 15): andamento di $D_{10} * R_i$ per la componente di moto parallela (FP) e normale alla faglia, in funzione dell'azimut θ della stazione rispetto alla faglia. E' anche mostrato il profilo di radiazione $\cos(2\theta)$ delle onde SH in campo lontano

T_D a valori > 10 s. L'effetto risulterebbe ancora più marcato per distanze < 75 km, dove appare più netta la deviazione dalla forma bilineare per SRS. Tuttavia, questi valori di T_D potrebbero essere sovrastimati dal modello 1D, e occorre una verifica da modellazioni 3D, già in corso.

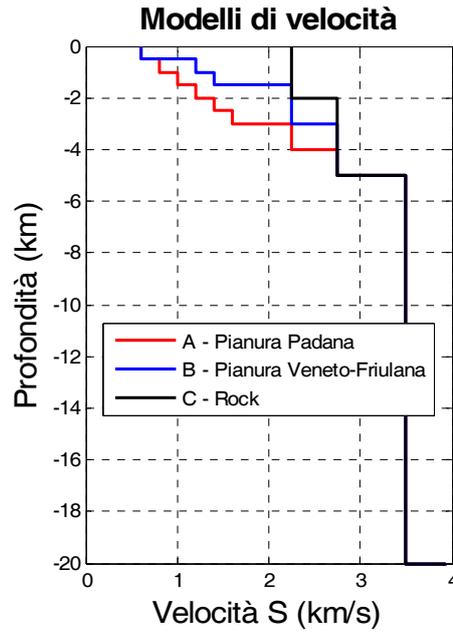


Figura 17 – Velocità delle onde S per i diversi modelli strutturali utilizzati: Pianura Padana (A, rosso), Pianura Veneto-Friulana (B, blu), modello di riferimento “rock” (C, nero). A è stato usato per gli scenari relativi ai terremoti Garda-Veronese e Garfagnana, B e C rispettivamente per gli scenari “Veneto” e “Rock”.

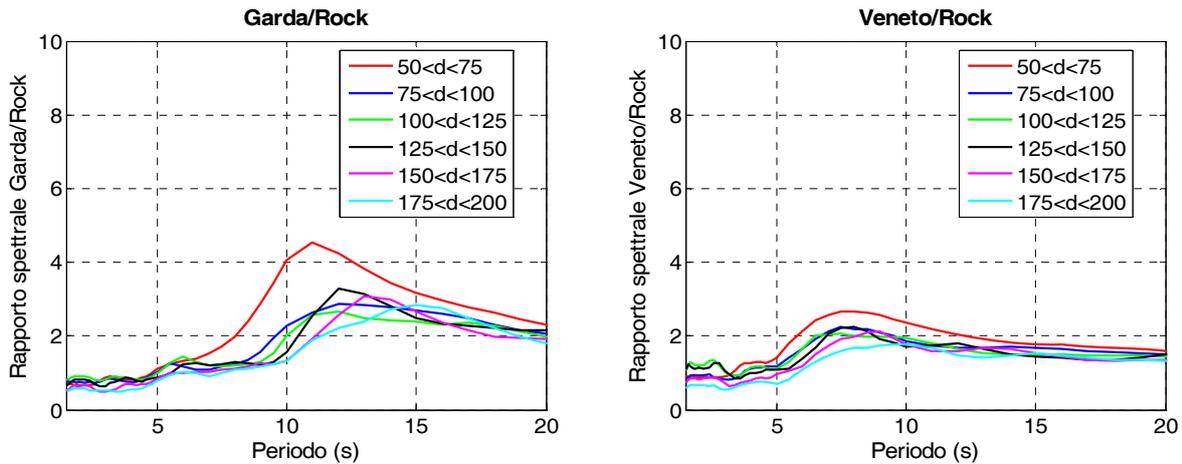


Figura 18 – Rapporti tra gli SRS calcolati a partire da un modello strutturale che include un bacino sedimentario profondo (profili A e B di Fig. 17) e quelli ottenuti per il modello “rock” (profilo C in Fig. 17), per due scenari sismici denominati “Garda” e “Veneto”.

Per quanto riguarda i criteri di riconoscimento di bacini e valli sedimentarie di medie e piccole dimensioni, essi sono, come già detto nel Cap. 2, fondamentalmente rappresentati da (i) aree a pendenza nulla, sufficientemente estese, v. Fig. 19(a), e (ii) simultanea presenza di depositi sedimentari (Fig. 19b). Quanto alla condizione $W_{min} = 2 (T_D * V_S)$ già introdotta nel Cap. 2 per la larghezza minima di interesse per un bacino o valle (basata sull’intervallo di periodi rilevanti, v. Fig. 19c), si riporta in Fig. 20 l’esempio della piana di Gioia Tauro, dove l’analisi di pericolosità (illustrata più sotto) fornisce $T_D = 3.5$ s (per periodo di ritorno 475 anni); se si assume $V_S = 500$ m/s mediamente i sedimenti della piana, risulta $W_{min} \geq 3.5$ km, chiaramente soddisfatta, come si vede dalle sezioni topografiche in Fig. 20.

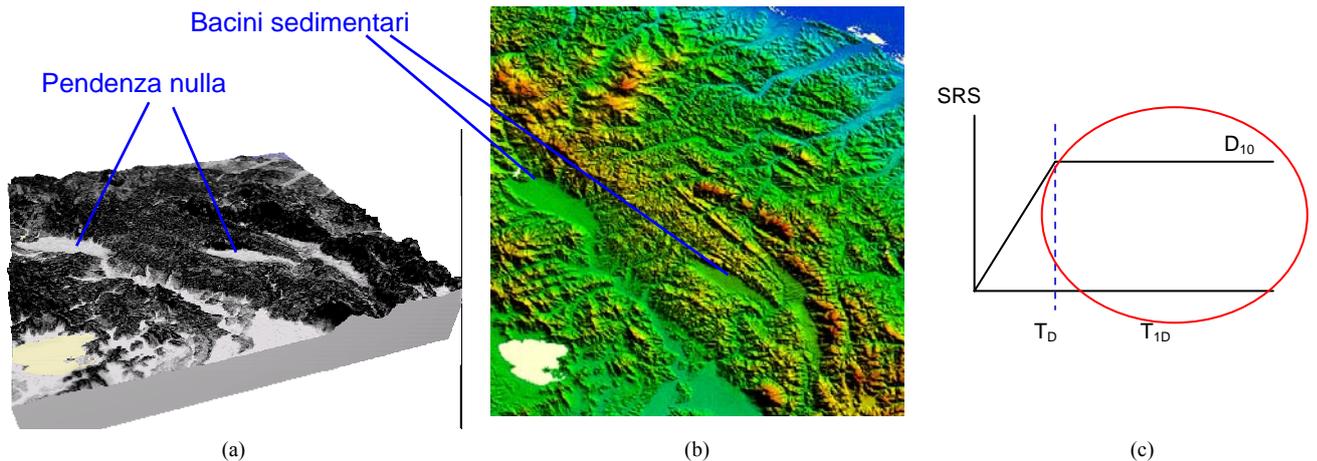


Figura 19 – (a) Due esempi di zone a pendenza nulla, (b) dati DEM SRTM, e (c) definizione intervallo di periodi di interesse per S5.

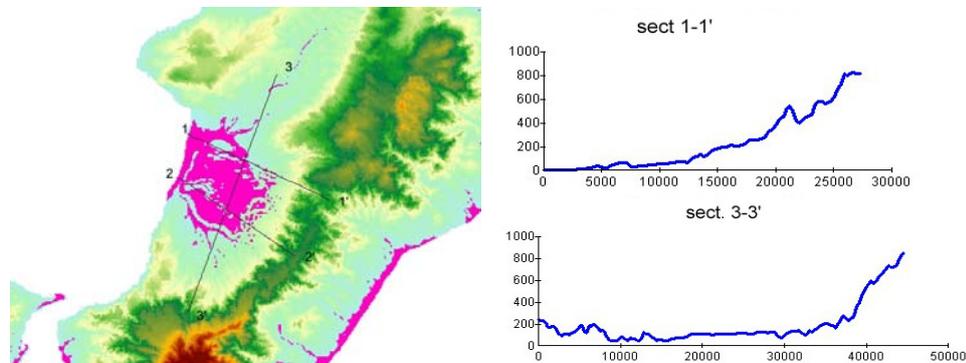


Figura 20 - Piana di Gioia Tauro: individuazione tramite GIS dell'area di bacino (in rosa) e relative sezioni

Nei prossimi mesi si procederà al riconoscimento sistematico di bacini e valli con i criteri testé descritti.

Gli effetti legati alle onde superficiali diffratte dai bordi in valli e bacini di medie e piccole dimensioni possono fortemente influire su ampiezza e forma degli SRS. In Fig. 21 vengono mostrati degli esempi di variazioni di SRS, causate da onde SH-Love (a sinistra) e SV-Rayleigh (a destra), calcolate con simulazioni numeriche 2D alle differenze finite di bacini infinitamente estesi. I due casi sono saggi preliminari dello studio parametrico condotto all'interno del Task 5, finalizzato alla stima speditiva di variazioni di SRS in funzione di angolo di incidenza dell'eccitazione, geometria (profondità e pendenza del bordo) e impedenza sismica dei bacini.

Come risulta dalla Fig. 21, le variazioni rispetto alle ordinate spettrali su roccia sono soprattutto significative per periodi $T < T_{1D}$ (= periodo fondamentale 1D del bacino nel punto più profondo⁴) a causa dell'eccitazione dei modi superiori. Va ribadito che in questo intervallo potrebbe anche risultare $T < T_D$ e quindi l'amplificazione riguarderebbe lo spettro di risposta di accelerazione e non quello di spostamento. Occorre anche sottolineare che in queste simulazioni preliminari si sono usate velocità P ed S costanti nei sedimenti. Nel prosieguo delle ricerche si adotteranno profili di velocità verticali del tipo $V_P(z) = 525 + 60 z^{1/2}$ e $V_S(z) = 260 + 30 z^{1/2}$, rispettivamente per onde P ed S, in accordo con il modello per le valli alpine definito recentemente nell'ambito del progetto SISMOVALP (2006). L'esito di tali modellazioni più realistiche, già iniziate, consentirà di meglio parametrizzare le variazioni di SRS in presenza di valli e bacini, per $T > T_D$.

Si è già menzionato nel Cap. 2 come, nell'ambito di questa stessa problematica, relativamente a valli e

⁴ I periodi dominanti legati a propagazione in 2D e 3D risultano sicuramente inferiori a T_{1D} in quanto derivanti da un modello più vincolato, e quindi più rigido.

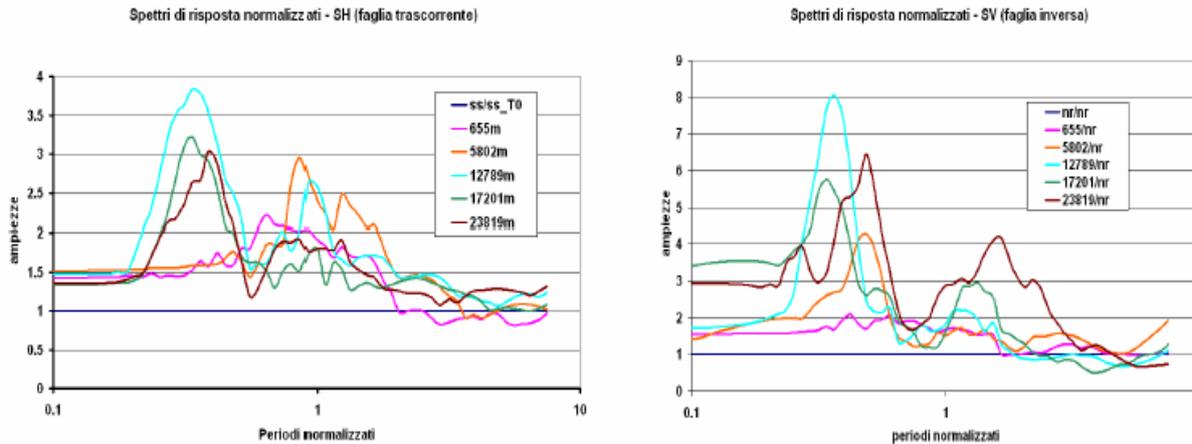


Figura 21 – Variazioni (calcolate con modello 2D) dei rapporti spettrali SRS rispetto a roccia affiorante lungo un bacino profondo 600 m ed infinitamente esteso, con contrasto di velocità pari a 3, pendenza del bordo e angolo di incidenza entrambi pari a 45°. I diversi colori rappresentano diverse distanze dal bordo e i periodi di vibrazione sono normalizzati rispetto al periodo fondamentale 1D dei sedimenti.

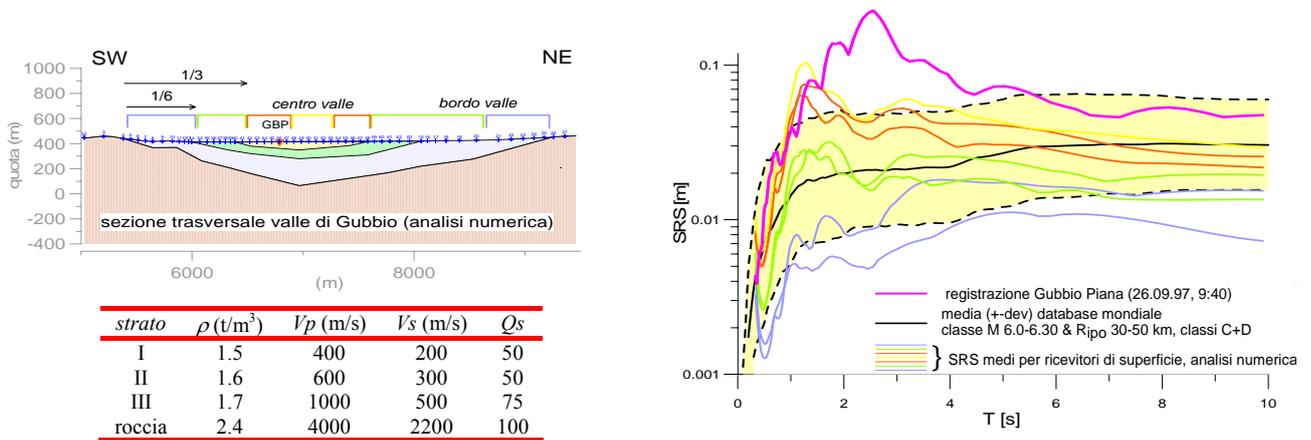


Figura 22 - Analisi di risposta sismica lungo una sezione trasversale della piana di Gubbio. A sinistra: schema del modello con proprietà dei materiali. A destra: confronti tra osservazioni e risultati numerici

bacini con sezioni chiuse, si stia indagando – per meglio focalizzare gli aspetti da tenere maggiormente in considerazione - sul caso reale della piana di Gubbio, modellando la scossa principale della sequenza di Umbria-Marche del 1997 (26.9.97, ore 9.40, M_w 6). Si usano allo scopo analisi 2D con metodi numerici ad elementi spettrali e la tecnica DRM di accoppiamento del dominio di calcolo crostale, che contiene la sorgente, e quello “locale” che contiene il bacino alluvionale (Bielak et al. 2003, Faccioli et al., 2004).

La Fig. 22 mostra uno schema del modello della sezione trasversale del bacino (passante per la stazione accelerometrica digitale di Gubbio Piana, GBP), con la stratigrafia adottata; si mostrano anche gli SRS medi calcolati dai sintetici in accelerazione lungo la superficie del bacino, distinti per colore in base alla loro posizione. E’ riportato inoltre lo SRS della registrazione di GBP dell’evento citato e l’involuppo delle osservazioni dal database mondiale, per tipo di suolo C+D. Come si nota, l’amplificazione della risposta sui sedimenti è assai significativa: al centro valle gli spettri simulati “bucano” l’SRS medio e la sua fascia di dispersione per periodi compresi tra 1 e 2 s mentre quello di GBP lo fa per periodi tra 1 e 5 s. E’ rilevante osservare che in questo caso T_{1D} è pari a circa 3s, a cui corrisponde il picco molto marcato dello spettro osservato nel sito GBP (Fig. 22).



3.5 Influenza di diverse forme di dissipazione sullo SRS (Task 2a)

A completamento di quanto già illustrato in 2.2.4, appare di particolare interesse la seconda delle attività già iniziate per la fase 2, cioè i confronti dello spostamento calcolato da analisi dinamiche non-lineari rigorose su modelli realistici di edifici a MGDL, usando come eccitazione accelerogrammi registrati, con lo spostamento stimato mediante SRS sovrasmorzato (valido per oscillatore a 1 GDL) per il quale il fattore ξ equivalente ($\xi_{effective}$) è valutato con le (7) e (8). Si sono usati 29 accelerogrammi registrati, di cui 14 da terremoti italiani, ottenendo la distribuzione risultante dei valori di DR di Fig. 23. Per ogni modello strutturale MGDL non lineare considerato si sono calcolati il valor medio, minimo e massimo dello spostamento massimo al variare dell'accelerogramma di eccitazione, ricavando poi anche il valor medio su tutti i casi. Pur essendo di sicuro conforto che i valori medi di DR sono prossimi all'unità, si è cercato di interpretare l'elevata dispersione risultante (maggiore di quella che risulta con accelerogrammi spettro-compatibili) valutando possibili correlazioni con parametri *strong motion* quali intensità spettrale di Housner, intensità di Arias, durata significativa e altri. Poiché non si sono finora ottenuti risultati soddisfacenti, tale verifica è in corso di approfondimento.

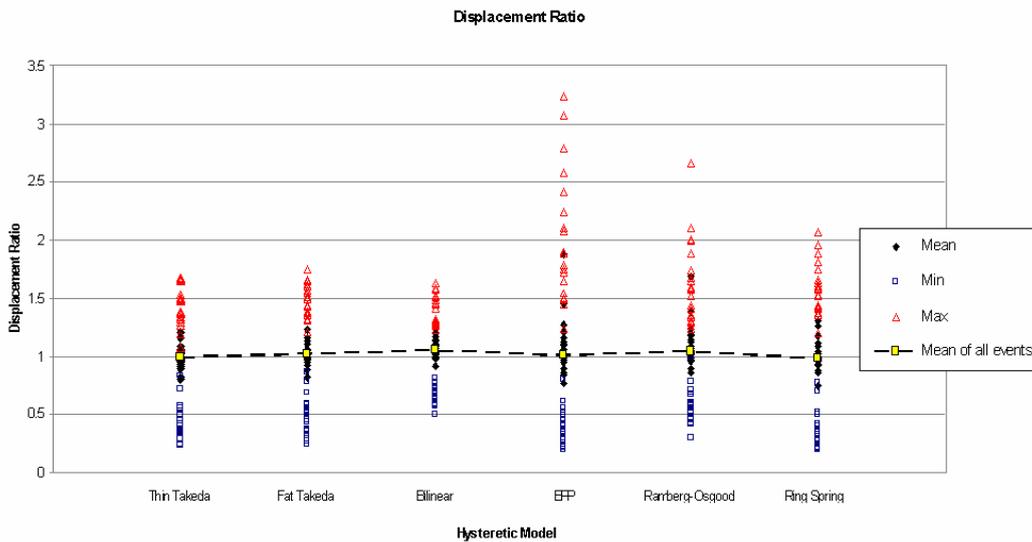


Figura 23 - Variazione, per tipo di modello strutturale non lineare, del rapporto (*displacement ratio*) tra lo spostamento calcolato da analisi dinamica rigorosa della struttura a MGDL (valore “esatto”) e quello approssimato ottenuto con lo SRS ridotto (sovrasmorzato) mediante le eq. (7) e (8) .

3.6 Spettri di verifica per costruzioni monumentali (Task 2b)

Esempi tipici di cinematici di macroelementi in costruzioni monumentali sono mostrati in Fig. 24 e così pure la curva di capacità adottata, di tipo elastico non lineare, derivante dal modello di Housner (1963). Anche qui, come nel precedente Task (par. 3.5), l'obiettivo è di formulare un metodo semplificato (di tipo “normativo”), che usa per calcolare lo spostamento della struttura gli SRS “sovrasmorzati” (per curve di capacità derivanti dall'approccio cinematico non lineare): il metodo semplificato viene validato confrontando lo spostamento massimo e la corrispondente accelerazione che esso fornisce con quelli ottenuti da analisi dinamiche non lineari passo-passo sul sistema a 1GDL, in cui viene integrata l'equazione di moto

$$\ddot{\theta} + \gamma \dot{\theta} + p^2 r(\theta) = -p^2 \frac{a_g(t)}{g} \quad (11)$$

con: $\theta = \theta(t)$ grado di libertà rotazionale, γ coefficiente di smorzamento funzione dello smorzamento equivalente ξ_{eq} , $r(\theta)$ forza di richiamo illustrata in Fig. 24(c), $a_g(t)$ l'accelerazione al suolo, e g

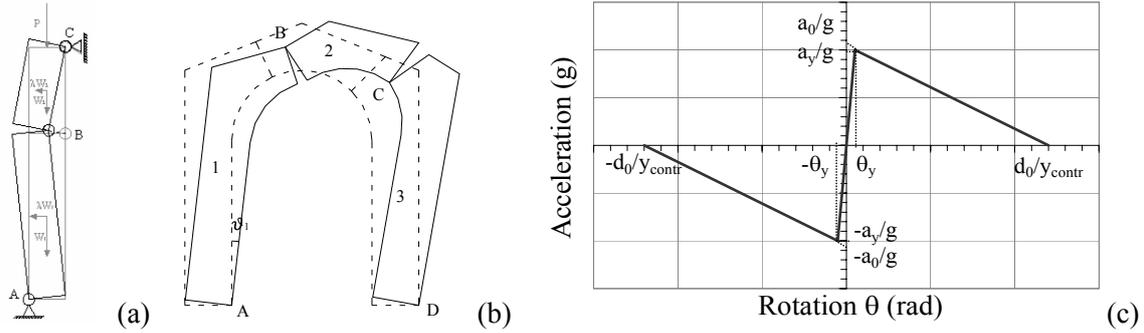


Figura 24 - Cinematismi di macroelementi: a) facciata (in presenza di catene); b) arco trionfale; c) curva di capacità (modello di Housner) con ramo elastico in termini di accelerazione (in unità di g) e rotazioni θ .

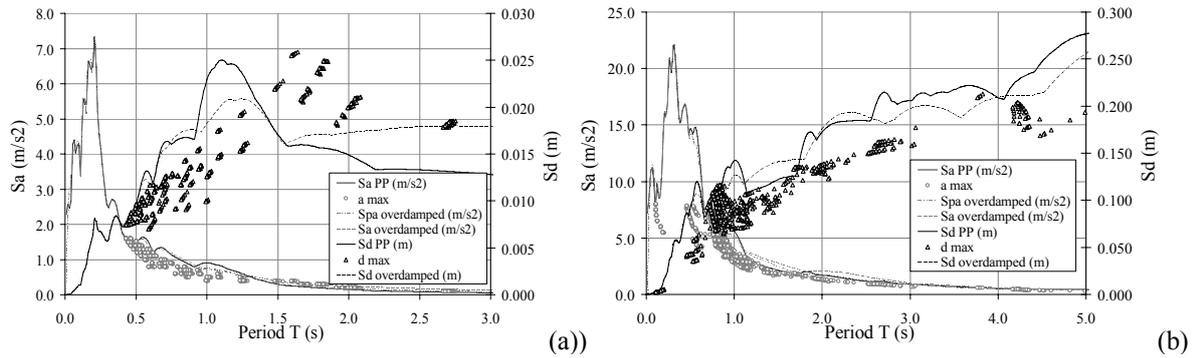


Figura 25 - Confronto tra analisi dinamiche e procedura semplificata: (a) Eccitazione data da Umbria-Marche 1997 reg. Colfiorito Casermette ; (b) Eccitazione data da Turchia (agosto 1999), reg. di Duzce.

accelerazione di gravità. Non essendovi dissipazione di tipo isterético nel sistema, lo smorzamento equivalente ξ_{eq} , valutate diverse possibilità, è stato definito in funzione del periodo come segue: 1) $\xi_{eq} = 5\%$ costante per $T \leq T_I$ con $T_I = 0.4$ s (valore convenzionale), 2) $\xi_{eq} = 20\%$ per $T \geq T_F$, 3) variazione lineare per $T_I \leq T \leq T_F$. Il valore costante per $T \leq T_I$ è stato imposto con la finalità di rendere la fase non lineare il più possibile indipendente dal periodo iniziale T_0 , affetto da notevole incertezza. Il limite superiore per $T \geq T_F$ è stato introdotto sulla base di evidenze sperimentali (Doherty et al., 2002). Per i sistemi a 1 GDL sono state identificate 864 combinazioni considerando parametricamente intervalli di valori plausibili dei parametri T_0 , accelerazione di attivazione a_0 , e spostamento ultimo d_0 . Per ciascun sistema considerato è stato valutato il periodo secante $T_{max} = T(\theta_{max})$ e calcolato $\xi_{eq} = \xi_{eq}(T_{max})$ secondo la correlazione già descritta. Lo spettro elastico è stato quindi ridotto tramite il fattore proposto dall'Eurocodice 8 (eq. 3.6 in §3.2.2.2), in funzione di ξ_{eq} e sono stati valutati lo spostamento $S_d(T_{max})$ e la corrispondente accelerazione $S_a(T_{max})$ sullo spettro sovrasmorzato, secondo il metodo semplificato. Per la validazione, questi valori sono stati confrontati con lo spostamento massimo d_{max} (corrispondente a θ_{max}) e la corrispondente accelerazione $a(T_{max})$ ottenuti dalle analisi dinamiche non lineari. Per sinteticità, si è usata una particolare modalità di rappresentazione dei risultati (Fig. 25), con doppio asse delle ordinate. Sono così raffigurati: 1) lo SRS ($=S_d$) ridotto ed il periodo T ; 2) lo spettro di accelerazione S_a , anch'esso ridotto ed il periodo T ; 3) lo spostamento massimo d_{max} dalle analisi dinamiche ed il periodo T ; 4) l'accelerazione $a(T_{max})$ corrispondente a d_{max} e T . Il metodo semplificato fornisce valori corretti, se il punto d_{max} sta sullo spettro ridotto in S_d e, contemporaneamente, $a(T_{max})$ giace sullo spettro sovrasmorzato in S_a . Per accelerogrammi artificiali spettro-compatibili, e spettri S_d e S_a di confronto dall'Eurocodice 8 (ridotti), il commento ai risultati è già stato fatto in 2.2.5: rispetto agli spettri reali dell'accelerogramma (sovrasmorzati), la previsione del metodo semplificato a periodo medio-lungo è in perfetto accordo con i risultati dinamici. Anche qui, come in 3.5, la situazione è meno soddisfacente, come già detto, quando l'eccitazione è data da accelerogrammi registrati, come si può vedere dall Fig. 25, e come è già stato commentato in 2.2.5: in particolare, se lo SRS dell'accelerogramma reale è "liscio" (*smooth*), ovvero privo di picchi o gole significative, il metodo semplificato fornisce buoni risultati, come si nota in Fig. 25b per la registrazione di Duzce (1999).



3.7 Analisi probabilistiche, saggi di rappresentazione della pericolosità sismica in SRS

Le analisi probabilistiche per disaggregazione condotte (con programma di calcolo elaborato ad hoc, e debitamente validato) su molti siti rappresentativi hanno, come già detto in 2.2.1, consentito di precisare i limiti degli intervalli di M_w e R_i di definizione della relazione di attenuazione (3) per l'applicazione al territorio italiano⁵. Un esempio è illustrato in Fig. 26: sono stati così stabiliti, in relazione alle relazioni di attenuazione (2) e (3) i seguenti limiti di definizione, per periodi di ritorno fino ad almeno 2500 anni:

- magnitudo: $5 \leq M_w \leq 7+$
- distanza ipocentrale: $5 \text{ km} \leq R_i \leq 150 \text{ km}$ (circa).

Per la verifica preliminare di plausibilità del modello bilineare semplificato di SRS, già introdotta in 2.2.1, un risultato esemplificativo per una delle due regioni analizzate (Arco Calabro) è presentato in Fig. 27. Per il sito considerato (Gioia Tauro, in regione ad elevata pericolosità) si ha ottimo accordo tra lo SRS bilineare determinato con analisi probabilistiche separate su accelerazione massima (da cui si determina con la (9) il tratto linearmente crescente) e D_{10} (tratto costante), e lo spettro medio dalle osservazioni mondiali per le classi di magnitudo e distanza contenenti la coppia dominante (nella fattispecie $6.4 \leq M_w < 6.6$ e $10 \text{ km} \leq R_i < 30 \text{ km}$) ottenuta preliminarmente con una analisi per disaggregazione sullo stesso sito. In particolare l'analisi probabilistica è stata condotta sia al 50- che al 84.1 percentile della previsione della relazione di attenuazione. Il buon accordo evidenziato in Fig. 27 è stato riscontrato anche per la quasi totalità delle altre località indicate sulla carta a sinistra della figura (unica eccezione: Crotone), e anche per l'altra regione studiata: Alpi Occidentali.

Sulla scorta di questi risultati assai confortanti sul modello SRS bilineare forniti dall'analisi probabilistica, si prevede che questa verrà estesa in tempi brevi (su suolo rigido) a tutto il territorio nazionale, predisponendo però altre validazioni indipendenti (spettri a pericolosità costante calcolati con relazioni di attenuazione per le ordinate SRS dipendenti dal periodo, ricavate dalla stessa base dati mondiale).

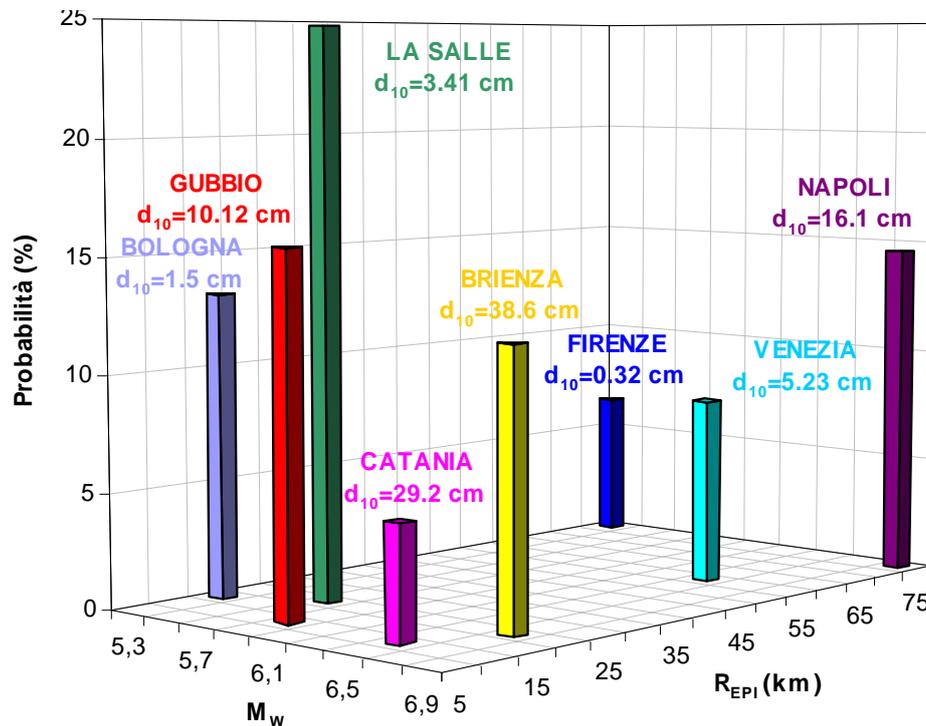


Figura 26 – Analisi per disaggregazione della pericolosità in D_{10} per periodo di ritorno 475 anni: ogni barra misura il contributo alla pericolosità (in %) della coppia (M, R_{epic}) che ha maggiore influenza sul sito indicato, del quale è anche dato lo spostamento a 10 s (D_{10}).

⁵ Nel calcolo probabilistico per disaggregazione si è usato il 50-percentile della (3) aumentato di uno scarto, come usuale.

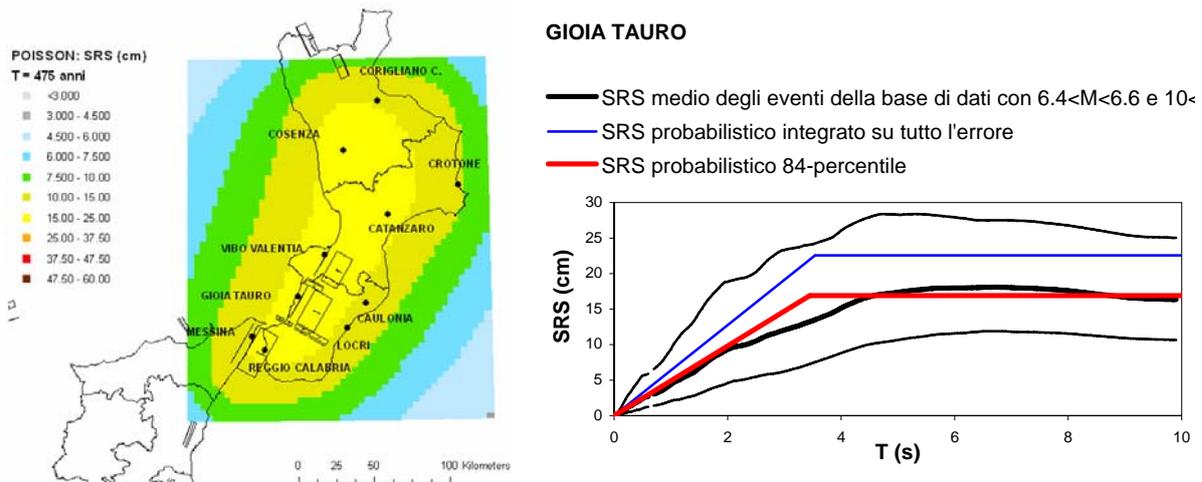


Figura 27 – Arco Calabro: pericolosità in D_{10} nell'ipotesi poissoniana sulle ZS929 e 930 per 475 anni (a sinistra) e confronto dello SRS probabilistico bilineare con lo SRS medio dai dati mondiali nell'intervallo di M e R_i corrispondente alla coppia dominante la pericolosità al sito di Gioia Tauro.

4. Eventuali difficoltà maggiori, modifiche di indirizzo, valutazione dell'attività delle UR, interazione con DPC .

Non vi sono state difficoltà maggiori, e non emerge quindi la necessità di apportare modifiche di indirizzo significative al progetto S5. Anche le attività previste per il secondo anno non subiranno pertanto variazioni sostanziali. Vedansi anche i commenti sui singoli Deliverables in Cap. 5 sotto.

Per quanto riguarda la valutazione delle UR, quasi tutte hanno contribuito fattivamente al raggiungimento di una percentuale consistente degli obiettivi prefissati. Tuttavia, si ritiene utile la seguente valutazione più dettagliata del loro apporto:

- E' stato di particolare ampiezza (ben superiore al previsto) e qualità lo sforzo svolto dalle UR 6 (Politecnico di Milano) e UR 3 (INGV Milano), che hanno affrontato la raccolta e organizzazione della base dati accelerometrica mondiale, le elaborazioni statistiche degli spettri e della relazione di attenuazione per D_{10} , l'aggiornamento e perfezionamento del modello di SRS, e i primi saggi concreti di carte di pericolosità in spostamento di parti del territorio italiano.
- Di buon livello, con vari spunti di originalità e del tutto in linea con le previsioni e i DL attesi l'operato delle UR2 (INGV Roma), UR4 (OGS Trieste), UR7 (Eucentre Pavia), e UR8 (Università di Genova).
- La UR5 (OGS Trieste) sembra aver trovato negli ultimi mesi del primo anno il giusto aggancio con le esigenze del progetto, dopo un periodo iniziale di incertezza e difficoltà di messa a fuoco.
- La UR1 (INGV Catania), pur avendo raccolto una notevole quantità di registrazioni *weak motion* di potenziale interesse ai fini del progetto, ha manifestato notevoli (e talora inspiegabili) difficoltà ad assimilare i criteri di rappresentazione dei dati e del loro uso ai fini richiesti (relazione di attenuazione in D_{10} per i terremoti etnei e sua eventuale anomalia rispetto alla (3)). Nell'ultima parte del primo anno, grazie anche all'interazione molto positiva con UR2, si sono avuti segni sensibili di progresso, manifestatisi positivamente con la proposta della eq. (4). Circa la continuazione dell'attività della UR1 nel secondo anno, si ritiene utile una valutazione più collegiale in sede di comitato di coordinamento dei progetti.
- Meno positiva del previsto la contribuzione della UR9 (Provincia di Trento), peraltro non finanziata dal progetto, dovuta soprattutto a difficoltà logistiche e lentezza nell'installazione delle stazioni della rete accelerometrica, nonché al funzionamento inferiore al previsto di alcuni strumenti.



Il progetto S5 ha goduto di un'interazione continua, e invero assai proficua con i rappresentanti del DPC (responsabile F. Sabetta), che hanno partecipato a tutte e tre le riunioni plenarie del progetto nel primo anno, e hanno partecipato in profondità, anche con suggerimenti importanti, al dibattito scientifico che ivi si è tenuto. Di fatto, si può dire che la loro partecipazione è stata in parte assimilabile più a quella di un'altra UR che a una funzione di controllo di rispondenza del lavoro svolto ai termini del progetto.

5. Stato di avanzamento dei singoli deliverables

Task 1

- 6 mesi: D1 - Completamento base dati mondiale di registrazioni strong motion digitali, acquisizione della componente verticale per tutta la base dati, correzione, e processamento degli spettri.
- 12 mesi: D2 - Conferma/modifica modello di rif. iniziale FPR04; se necessarie modifiche, formulazione di ipotesi di modello aggiornato.

Entrambi i DL ampiamente completati, e si è ad uno stadio avanzato anche per il DL a 18 mesi, come si evince da questa relazione.

Task 2

Tema (a):

- 6 mesi: D5 - Completamento attività (a), (b) pag. 55
- 12 mesi: D6 - Quantificazione fattori di riduzione dello SRS, rapportati a spettro standard (smorzamento 5%), in funzione di duttilità e T .

Tema (b):

- 6 mesi: D8 - Completamento analisi preliminari per scelta di configurazioni caratteristiche in strutture monumentali ai fini analisi SRS.
- 12 mesi: D9 - Esecuzione e completamento analisi dinamiche non lineari di modelli di configurazioni caratteristiche in strutture monumentali.

Tutti e quattro i DL completati, come illustrato nei precedenti capitoli. Da approfondire le marcate differenze nei risultati a seconda che si usino accelerogrammi di eccitazioni artificiali o artificiali (spettro compatibili).

Task 3

- 6 mesi: D11 - Formulazione quantitativa preliminare, applicabile a relazioni di attenuazione, di modifiche a SRS per direttività in funzione di T e M ;
- 12 mesi: D12 - Formulazione quantitativa, applicabile a relazioni di attenuazione, di modifiche a SRS per meccanismo di faglia.

Entrambi i DL in larga parte completati (90%), ma rimodulati dalle considerazioni esposte in 2.2.2; in particolare per il D12 si vedano le eq. (5) e (6), che vanno trasformate in D_{10} ed espresse in funzione di R_i (dist. ipocentrale) anziché di r_c (dist. dal centro della zona di rottura).

Task 4

- 6 mesi: D14 – (a) Italia: formazione base dati per eventi con $M > 4$ e verifica se regionalizzare o meno attenuazione spostamento di picco (D_{10}); (b) Zona etnea: selezione base dati e prime formulazioni rel. di atten.; (c) Trentino: layout configurazione finale rete accelerometrica e analisi primi dati.
- 12 mesi: D15 – (a) Italia e zona etnea: relazioni di attenuazione finali per spostamento di picco del suolo – prima uscita; (b) Trentino: quadro attività rete accelerometrica fine 1° anno, e ipotesi su modelli di attenuazione weak motion.

D14 (a) e (b) completati: non è emersa evidenza che giustifichi relazioni di attenuazione regionalizzate per D_{10} . D15 (a) in buona parte brillantemente compiuto per i dati italiani (85%, mancano le elaborazioni sulle componenti verticali delle registrazioni), grazie anche al confronto con la regressione dalla base dati mondiale; i dati etnei, per un completo utilizzo nelle regressioni (al



momento sono stati usati solo eventi con $M_w > 4$), necessitano di modellazione *ad hoc* mediante sismogrammi sintetici per la stima di M_w , per magnitudo inferiori a 4 (compimento stimabile al 70% per i dati etnei).

D14 (c) e D15(b) completati solo parzialmente, causa ritardi per difficoltà logistiche nell'installazione delle stazioni delle rete accelerometrica del Trentino (attualmente 5 stazioni). Dati ancora scarsi.

Task 5

- 6 mesi D17 – (a) Definizione configurazioni geologiche e sorgenti (scala decine a centinaia km) da modellare numericamente e uscita primi risultati; (b) impostazione e risultati prime analisi 2D per effetti di bordo bacini sedimentari.
- 12 mesi D18 – (a) Modelli attenuazione numerica grandi strutture geologiche, tipo Pianura Padana; (b) Formulazione (eventuali) modifiche ad attenuazione d_{max} per effetti di bordo bacini sedimentari – prima uscita.

I deliverables D17 e D18 hanno raccolto i contributi di numerose unità di ricerca (UR2, UR3, UR4 ed UR6) che, attraverso modellazioni numeriche, hanno fornito valutazioni preliminari delle modifiche agli SRS necessarie in bacini sedimentari di varia forma e dimensione. Per la pianura Padana e Veneto-Friulana, i calcoli con modellazioni 1D sono stati completati, e sono in fase di avanzata elaborazione modellazioni 3D non previste nel piano iniziale (UR4). Per la stima degli effetti 2D e 3D (legati alla diffrazione ai bordi), i metodi di calcolo sono stati calibrati con casi reali (piana di Gubbio, da parte di UR3 ed UR6) e predisposti per test parametrici (UR2).

D17(a), circoscritto a pianure Padana e veneto-friulana, può considerarsi completato, e così pure D17(b). D18(a) completato per quanto riguarda modelli cristalli 1D. D18(b) ridefinito: non si tratta più tanto di formulare modifiche ad attenuazione D_{10} ($= d_{max}$) bensì allo SRS adottato per periodi $T > T_D$, in funzione di pochi parametri geometrici e meccanici e del livello di sismicità. Completati e verificati i criteri di identificazione di valli e bacini, in corso il loro “inventario”.

Task 6

- 6 mesi D20 – Indagini preliminari su strumenti di calcolo per creazione mappe probabilistiche di pericolosità in termini di SRS.
- 12 mesi D21 - Integrazioni prime uscite da altri tasks per verificare effetti loro inclusione su mappe pericolosità, in particolare per campo vicino e importanti bacini sedimentari.

D20 completato e arricchito (v. Cap. 2 e 3 sopra).

D21 completato per un aspetto con decisione di non introdurre esplicitamente effetti di campo vicino in mappe di pericolosità. Per importanti bacini sedimentari, sostanzialmente completato a seguito della ridefinizione descritta sopra, in D18 (b).

6. Fattibilità delle attività previste per il secondo anno: previsioni, aggiustamenti dei DL, esigenze.

Le attività e, in particolare, i DL previsti per il 2° anno appaiono fattibili, con i seguenti aggiustamenti, peraltro di limitata entità:

- D4 (modello SRS comprendente effetti di campo vicino): ritenuto non più necessario, per quanto sopra ampiamente argomentato;
- D7, verrà ampliato con un nuovo obiettivo, già introdotto in 2.2.4: i risultati ottenuti (che mirano alla definizione di SRS sovra-smorzati) saranno estesi a SRS anelatici, tipicamente impiegati in metodologie di progettazione diverse dal DDBD (*Direct Displacement-Based Design*), rispondendo così a una delle richieste dei revisori
- D13: vi sarà solo la relazione scientifica finale, essendo venuta meno – a ragione di quanto sopra ampiamente argomentato – la necessità di ricorrere a una formulazione semplificata rispetto a modellazioni avanzate;
- D16: per Italia è già stato sostanzialmente completato a 12 mesi. Per i terremoti etnei, la



difficoltà maggiore nella prima fase è derivata dalla inadeguatezza delle magnitudo disponibili per gli eventi locali (M_L o M_d , entrambe prive di calibrazione specifica per l'area etnea), che non ha consentito di calcolare regressioni affidabili per D_{10} sulla base delle registrazioni selezionate. Stime di M_w sono attualmente disponibili solamente per gli eventi più forti ($M > 4$), relativi allo sciame di ottobre 2002. Grazie alle registrazioni accelerometriche RAN di questi eventi si è comunque potuto, in via preliminare, modificare la dipendenza dalla magnitudo valida per il resto dell'Italia in modo da rendere la (3) applicabile anche per l'area etnea (eq. 4). Per ovviare alla carenza notata per gli eventi selezionati da UR1, tutti con $M < 4$, la stessa UR procederà nella seconda fase al calcolo di M_0 simulando le forme d'onda di buona qualità disponibili (circa 60) con sismogrammi sintetici. Ciò dovrebbe consentire di migliorare la (4) includendo anche una correzione sulla distanza che riproduca la più rapida attenuazione di questi eventi entro i primi 20-30 km.

- D19: viene ridefinito nel senso già spiegato: le modifiche sono da apportare alla forma dello SRS di riferimento, piuttosto che alla relazione di attenuazione;

- D22: qui entra in gioco potenziale interazione con progetti S2 ed S5 (scelta modello zone sismogenetiche da usare per carta di pericolosità), e forse S1. Per evitare rischi legati a non uscite di prodotti attesi dagli altri progetti, verranno usate – con appropriate modalità di inserimento anche in albero logico – le zonazioni sismogenetiche di DISS 3 (versione che sarà disponibile al 2007) e la ZS9, con eventuali modifiche che potranno essere rese disponibili da S1

- D23: è il DL fondamentale di S5. Tenendo anche conto che, allo stato, la sinergia prevista con S1 nella elaborazione delle mappe finali potrebbe essere meno estesa di quanto previsto inizialmente, si delineano sin da ora le seguenti caratteristiche essenziali:

- il parametro base di rappresentazione della pericolosità sarà D_{10} ;

- il modello base dello SRS sarà quello bilineare illustrato in questa relazione;

- gli ingredienti minimi per la costruzione dei rami dell'albero logico saranno: almeno 2 diverse rappresentazioni della geometria delle zone sismogenetiche, modello di terremoto caratteristico accanto a processo poissoniano per alcune zone e faglie sismogenetiche, tassi di occorrenza e criteri di completezza trattati come in Gruppo di Lavoro (2004);

- in vista della grande robustezza dei risultati ottenuti sull'attenuazione del parametro D_{10} , non si prevede l'uso di altre relazioni di attenuazione;

- verifica indipendente dei risultati (almeno per alcune regioni): attraverso spettri a rischio uniforme, con relazioni di attenuazione dipendenti dal periodo di vibrazione (che verranno elaborate nella seconda fase dalla base di dati mondiale).



7. Riferimenti bibliografici

- Bielak J., Loukakis K., Hisada Y., Yoshimura C. (2003), Domain Reduction Method for three-dimensional earthquake modeling in localized regions, Part I: Theory, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93** (2), 817-824.
- Bommer, J.J., Mendis R. (2005). Scaling of spectral displacement ordinates with damping ratios. *Earthq. Engng. Struct. Dyn.* **34**, 145–165.
- Cassano E., Anelli L., Fichera R., e Cappelli, V. (1986). Pianura Padana – interpretazione integrata di dati geofisici e geologici. 73° Congresso Società Geologica Italiana, 29 settembre – 4 ottobre 1986, Roma.
- CEN (Comité Européen de Normalisation) (2004) *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, Brussels, May.
- Chávez-García F. e Faccioli E. (2000). Complex site effects and building codes: Making the leap, *J. Seismol.*, **4** (1), 23-40.
- Dogliani C. (1993). Some remarks on the origin of foredeeps. *Tectonophysics* **228**, 1-20.
- Dogliani, F., Moretti A. & Petrini V. (1994). *Le chiese e il terremoto*. Trieste: Edizioni LINT.
- Doherty K.T., Griffith M.C., Lam N., e Wilson J. (2002). Displacement-based seismic analysis for out-of-plane bending of unreinforced masonry walls. *Earth. Engng. and Struct. Dyn.* **31**, 833–50.
- Faccioli E., Paolucci R. e Rey J. (2004), Displacement spectra for long periods, *Earthquake Spectra*, **20** (2), pp. 347-376.
- Faccioli E., Vanini M., Paolucci R., Stupazzini M. (2005), Comment on "Domain Reduction Method for Three-Dimensional Earthquake Modeling in Localized Regions, Part I: Theory," by J. Bielak, K. Loukakis, Y. Hisada, and C. Yoshimura, and "Part II: Verification and Applications," by C. Yoshimura, J. Bielak, Y. Hisada, and A. Fernández, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **95** (2), pp. 763-769.
- Hisada Y. (1994). An efficient method for computing Green's functions for a layered half-space with sources and receivers at close depths, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **84** (5), 1456-1472.
- Hisada Y. (1995), An efficient method for computing Green's functions for a layered half-space with sources and receivers at close depths (Part 2), *Bull. Seismol. Soc. Am.* **85** (4), pp. 1080-1093.
- Housner, G.W. (1963). The behaviour of inverted pendulum structures during earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **17**, pp.40-417.
- Joyner W., Boore M. (1981), Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.* **71** (6), pp. 2011-2038.
- Montaldo V., Faccioli E., Zonno G., Akinci A., Malagnini L. (2005), Treatment of ground-motion predictive relationships for the reference seismic hazard map of Italy, *J. Seismol.* **9** (3), pp. 295-316.
- Gruppo di Lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica (2004), INGV, Rapporto Conclusivo, <http://zonesismiche.mi.ingv.it/>.
- Olsen K.B., Day S.M., and Bradley C.R. (2003). Estimation of Q for long-period (>2 sec) waves in the Los Angeles Basin. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**, 2, 627-638.
- OPCM: Ordinanza Presidenza Consiglio dei Ministri 3431 (2005), *Ulteriori modifiche e integrazioni all'ordinanza pcm n. 3274 del 20 marzo 2003*, recante "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica", Allegato 2 "Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici", *Presidenza del Consiglio dei Ministri*, 3 maggio 2005.
- Ordaz M., Jara J. M., Singh S. K. (1991) Riesgo sísmico y espectros de diseño en el estado de Guerrero. Technical Report, Instituto de Ingeniería, UNAM, Mexico City.
- Pettenati F. e Sirovich L. (2003). Tests of source-parameter inversion of the U.S. Geological Survey intensities of the Whittier Narrows, 1987 Earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93** (1), 47-60.
- SISMOVALP (2004). Priolo E.: Sismovalp Project, WP6 – Simulation benchmark, Report 1.6 - Definition of the 2D simulations (final document), Project Report, June 21, OGS Trieste.
- Spudich, P. e Xu L. (2003). Software for calculating earthquake ground motions from finite faults in vertically varying media, in *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, Academic Press.



8. Tabelle finanziarie riepilogative (KEuro)

UR	Istituzione	Personale		Missioni Italia		Missioni estero		Consumi e Servizi		Inventariabile		Totale		tot
		2005	2006	2005	2006	2005	2006	2005	2006	2005	2006	2005	2006	
1	INGV-CT	0	0	1,5	0,8	4,0	2,2	3,5	2,0	0	0	9,0	5,0	14,0
2	INGV-RM1	0	0	4,0	2,0	16,0	7,0	18,0	9,0	6,0	4,0	44,0	22,0	66,0
3	INGV-MI	0	0	3,5	4,0	3,5	4,0	5,0	8,0	6,0	2,0	18,0	18,0	36,0
4	INOGS	25,4	12,7	4,3	3,5	0	0	3,3	1,8	0	0	33,0	18,0	51,0
5	INOGS	0	0	3,0	3,0	0	0	2,5	3,0	0	0	5,5	6,0	11,5
6	PoliMI	20,0	11,0	4,0	2,0	3,0	3,0	5,0	3,5	6,0	3,0	38,0	22,5	60,5
7	EUCENTRE	20,0	10,0	1,0	1,0	6,0	4,0	5,0	2,0	5,0	2,0	37,0	19,0	56,0
8	UniGE	20,0	10,0	3,0	2,0	4,0	3,0	5,0	2,0	5,0	2,0	37,0	19,0	56,0
		85,4	43,7	24,3	18,3	36,5	23,2	47,3	31,3	28,0	13,0	221,5	129,5	351,0

Totale (Euro): 351.000

INGV: 116.000 (33%)

Altri Enti: 235.000 (67%)

UR	Istituzione	Responsabile	Mesi/Pers. (cofin.)	Mesi/Pers. (richiesti)
1	INGV-CT	Langer	18	-
2	INGV-RM1	Herrero	18	-
3	INGV-MI	Pessina	17	-
4	INOGS	Vuan	4	15
5	INOGS	Sirovich	16	-
6	PoliMI	Paolucci	8	20
7	EUCENTRE	Pinho	5	16
8	UniGE	Lagomarsino	5	16
Totale			91	67