

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

INDICE

1	UR 1: Catania / Roma1	3
1.1	Obiettivi	3
1.2	Riassunto dell'attività	3
1.3	Valutazione sullo stato di avanzamento	5
1.4	Motivi che hanno ostacolato l'avanzamento	6
1.5	Pubblicazioni	6
1.6	Bibliografia	6
2	UR 2: INGV Roma1	7
2.1	Obiettivi	7
2.2	Stato di avanzamento	7
2.3	Analisi parametriche di onde di lungo periodo generate localmente nei bacini sedimentari (Task 5).	12
2.4	Pubblicazioni	13
3	UR 3: INGV Mi	14
3.1	Obiettivi	14
3.2	Stato di avanzamento	14
3.2.1	Contributi al perfezionamento del modello di riferimento (Task 1)	14
3.2.2	Task 5: Contributi ad analisi parametriche in bacini sedimentari	15
3.2.3	Rappresentazione della pericolosità sismica	17
3.3	Bibliografia	20
4	UR 4: OGS Trieste	22
4.1	1. Obiettivi	22
4.2	Stato di avanzamento	22
4.2.1	Definizione di modelli crostali di riferimento	22
4.2.2	Scelta dei terremoti di riferimento per le modellazioni	22
4.2.3	Modellazioni	22
4.2.4	Scelta della base accelerometrica digitale di riferimento per il confronto con i dati calcolati	23
4.3	Attività prevista nei prossimi 6 mesi	23
4.4	Riferimenti bibliografici	23
5	UR 5: OGS Trieste	26
5.1	Obiettivi	26
5.2	Stato di avanzamento	26
5.3	Bibliografia	28
	Schweitzer J., F. Pettenati, H. Bungum and L. Sirovich (2005). The earthquake of 23 october 1904 in the Oslo Fjord area. Gen. Ass. IASPEI Chile, Oct. 2-8, 2005, abstract and poster.	28
	Sirovich L. and F. Pettenati (2005). Validation of a new hazard scenario (maximum particle displacements); Northridge, 1994. 1 st European Conf. Earthquake Engineering and Seismology. September 3-8, 2006, Geneva, Switzerland.	28
6	UR 6: POLIMI	29
6.1	Introduzione	29
6.2	Costruzione della base di dati mondiale	29

6.3	Scelta della procedura di correzione ottimale	29
6.4	Elaborazione delle forme spettrali medie per tutta la base di dati	31
6.5	Effetti della categoria di suolo	32
7	UR 7 : EUCENTRE	33
7.1	I anno di attività	33
7.1.1	Task 2a) Revisioni delle formulazioni attualmente disponibili per il calcolo dei fattori di riduzione dello SRS, e individuazioni dei loro limiti e necessità di sviluppo	33
7.1.2	Task 2b) Analisi dinamiche non lineari su sistemi ad 1 gdl, variando il periodo di vibrazione, le capacità di deformazione e il tipo di risposta	33
7.1.3	Task 2c) Derivazione dei fattori di riduzione dello SRS, rapportati allo spettro elastico standard (smorzamento 5%), in funzione della duttilità e periodo della struttura	33
7.2	II° Anno di attività	34
7.2.1	Task 2d e 2e) Verifica delle equazioni per strutture a molti gradi di libertà, incluso edifici con comportamento degradante (rigidezza e resistenza) nella fase post-picco	34
7.2.2	Task 2f) Verifica delle equazioni proposte per accelerogrammi reali [TASK NUOVO]35	
7.2.3	Task 2g) Estensione dei risultati ottenuti (che mirano alla definizione di SRS sovra-smorzati) a SRS anelastici [TASK NUOVO]	35
8	UR8: UniGe	36
8.1	Premessa	36
8.2	Il modello dinamico	36
8.3	Definizione dell'input sismico	37
8.4	Definizione preliminare della procedura per la valutazione della risposta	37
8.4.1	Risultati e commenti	38
8.4.2	Considerazioni sui fattori di riduzione dello spettro	39
8.5	Attività previste nel breve periodo	39
8.6	Riferimenti Bibliografici	39

1 UR 1: Catania / Roma1

1.1 Obiettivi

- Creazione di un database delle forme d'onda in spostamento del suolo di terremoti registrati nell'area Etnea dalle stazioni della rete sismica permanente broad-band;
- Formulazione di una legge di attenuazione dello spostamento massimo del suolo con la distanza.

1.2 Riassunto dell'attività

Data set. Fin al momento della relazione sono state raccolte ca. 600 terne di registrazioni relative a ca. 80 eventi con magnitudo $M_L \geq 2.5$ (Fig. 1.1a). La profondità di tali eventi varia da 30 km fino a valori inferiori ad 1 km. La qualità del segnale in termini di spostamento è da valutare medio-alto per i dati con $M_L \geq 3.0$, con rapporto segnale/rumore (S/N) ca. 20dB o superiore, mentre scende notevolmente per gli eventi più piccoli. In alcuni casi i dati sono affetti da disturbi imputabili a varie cause, come la presenza del moto ondoso del mare ed il tremore vulcanico, particolarmente presente alle stazioni sommitali. Data la considerevole eterogeneità del data set (in termini di magnitudo e profondità) si è deciso di considerare infine soltanto gli eventi con $M_L > 3.0$.

Trattamento dei dati. Allo scopo di studiare una legge di attenuazione è auspicabile un trattamento uniforme dell'intero data set onde evitare l'introduzione di incontrollabili bias alle singole tracce. Trattandosi di eventi di modesta magnitudo (comunque inferiori a $M_L = 4.0$) si è applicata una procedura che consiste nella rimozione di offset, trend e media mobile di 5 s e integrazione con la regola di Tick. In tal modo si riesce a rimuovere i disturbi a bassa frequenza, ed in particolar modo il noise causato dal moto ondoso del mare. Data l'alto rapporto S/N riscontrato nei segnali selezionati per la stima della legge di decadimento, mostrata in Fig 1.1b, si è potuto evitare la rimozione della media mobile a 5 s. Al momento si sono utilizzate le localizzazioni standard dell'INGV sezione CT.

Formulazioni di leggi di attenuazione dello spostamento massimo del suolo. Nell'area in questione esistono al momento solo alcuni eventi registrati in un ampio intervallo di distanza, in altre parole l'intervallo di distanza coperto dalla rete sismica varia, pertanto, da evento a evento. Questo è dovuto sia alle modeste magnitudo riscontrate finora ma anche dalla rete sismica che tutt'ora è in via di ampliamento e potenziamento. Per rimediare a questo problema si è tentato costruire la legge di attenuazione in due successive passi:

- a) è stata eseguita una regressione individuale per ogni evento
- b) è stata applicata una normalizzazione in modo tale che l'ampiezza a distanza di 10 km di ogni evento abbia un valore di 1 mm.

Si è così ottenuta una legge generalizzata graficando tutti i valori normalizzati in un diagramma Log Ampiezza (D10 nel nostro caso) vs Log Distanza. Questo approccio corrisponde essenzialmente al modo di procedere seguito da Richter (vedi Richter, 1958) quando definì il valore di magnitudo locale e la legge di correzione per la distanza. Si è deciso di focalizzare l'attenzione su eventi con una profondità inferiore a 10 km poiché essi rappresentano gli scenari di pericolosità più alta della zona Etnea. Sono stati esclusi dati con un rapporto S/N inferiore a 20 dB nell'intervallo di frequenza tra 0.1 e 5 Hz. La legge di attenuazione sulla base di 8 eventi con $M_L \geq 3.0$, ottenuta da una regressione log-log è data dalla seguente relazione:

$$\text{Log D10 (m)} = C - 1.4 \log R_{\text{ipo}}$$

dove R_{ipo} è la distanza ipocentrale in km e D10 il valore dello spettro di risposta in spostamento calcolato ad un periodo di 10 s. Simili relazioni si ottengono per il parametro D5 (spettro di risposta in spostamento a 5 s) e per lo spostamento massimo del suolo. Resta comunque una notevole incertezza nella legge di attenuazione che è da ricercarsi nelle cause intrinseche alla natura fisica del problema, quali la ben nota complessità dell'edificio vulcanico e le particolari geometrie sorgente-ricevitore che si riscontrano negli eventi etnei.

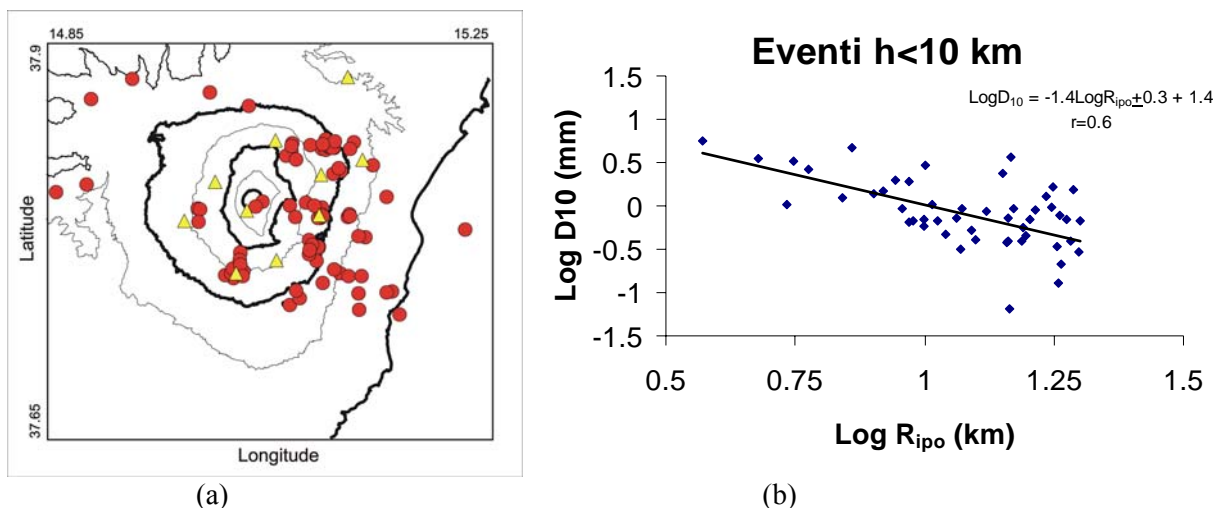


Fig. 1.1 Mappe degli eventi etnei (a) e legge di attenuazione per il parametro D10 (b) sulla base degli eventi con $M_L > 3.0$ e profondità < 10 km. Cerchi rossi: epicentri degli eventi $M_L \geq 2.5$, triangoli: stazioni sismiche broadband della rete permanente del INGV-CT.

Tali condizioni causano una rapida variazione di fattori importanti come il “radiation pattern” e gli angoli di incidenza che sono noti influenzare i coefficienti di trasmissione e riflessione del mezzo di propagazione delle onde (Chapman, 2003). La UR1 ha pertanto esaminato il grado di variabilità causato da quest’ultimi fattori tramite la simulazione di sismogrammi sintetici (metodo di riflettività, ved. Ungerer, 1990 e Müller, 1985) per eventi ben documentati utilizzando parametri geotecnici riportati nella letteratura (Tab. 1.1). Da una analisi spettrale si è riscontrata una frequenza “corner” di 10 Hz per entrambi eventi dimostrati qui. Tale frequenza è stata utilizzata nelle simulazioni sintetiche.

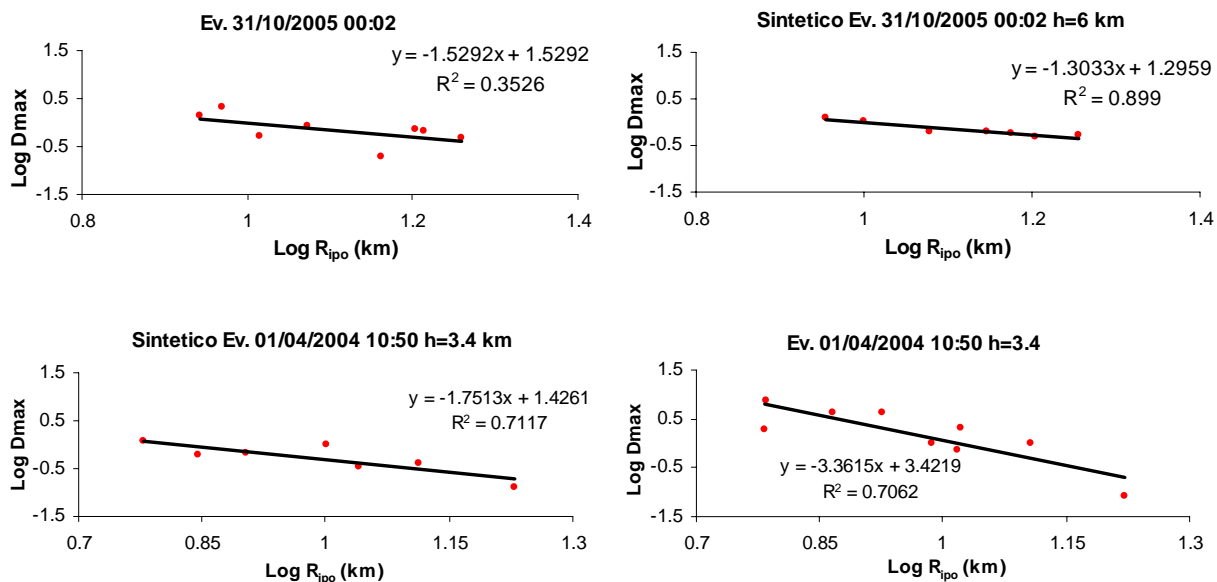


Fig. 1.2. Confronto di leggi di decadimento osservati e simulati per eventi ben documentati

I risultati ottenuti relativi agli eventi per i quali sono stati calcolati i sismogrammi sintetici dimostrano una discreta concordanza con i dati osservati, in particolare per quanto riguarda la legge di attenuazione dello spostamento massimo (Fig. 1.2). I calcoli sintetici rivelano anche una dipendenza del decadimento delle ampiezze dalla profondità della sorgente. Con l’ipocentro più superficiale l’effetto di attenuazione tende ad aumentare. Inoltre, i dati dell’evento più superficiale dimostrano una attenuazione ancora più forte di quella ottenuta dalle simulazioni. Una delle cause della discrepanza fra dati osservati e calcolati in questo caso è da

ricercare nella scarsa conoscenza dei parametri geotecnici degli strati più superficiali nonché della loro variabilità.

Profondità (km)	V _P (km/s)	V _S (km/s)	Densità (g/cm ³)	Q _P	Q _S
0.0	3.0	1.9	2.5	50	80
0.5	3.6	2.0	2.7	50	80
2.0	4.0	2.3	2.7	50	80
4.0	4.8	2.8	2.7	50	80
6.0	5.6	3.2	2.7	100	200
12.0	6.5	3.6	2.7	400	800
30.0	8.1	4.6	3.3	800	1500

Tab. 1.1. Parametri geotecnica utilizzati per le simulazioni (ved. Hirn, 1991, Patane et al., 1993, Giampiccolo et al., 2006)

Localizzazione 3D. E' noto che la localizzazione di eventi superficiali pone particolari problemi in quanto risulta spesso instabile. Per questo motivo la UR1 ha iniziato uno studio sull'affidabilità delle localizzazioni che è tuttora in corso. E' stato scelto un test set di dati registrati nel periodo 2002-2003, durante l'eruzione dell'Etna. L'analisi si basa su localizzazioni eseguite con il metodo NONLINLOC proposto da Lomax et al. (2000) dove la ricerca della localizzazione avviene tramite una ottimizzazione non-lineare. Per il censimento della stabilità delle localizzazioni i parametri di ingresso (tempi di arrivo delle fasi sismiche, valori di velocità del modello crostale 3D) sono stati perturbati in modo casuale. Il "range" di perturbazione di questi parametri varia da $\Delta t = 0.05$ a $\Delta t = 0.4$ s per i tempi di arrivo e di $\Delta v = 50$ m/s a $\Delta v = 1600$ m/s (Fig. 1.3). Si conferma una notevole stabilità delle localizzazioni anche in presenza di forti disturbi (fino a $\Delta t = 0.2$ s e $\Delta v = 400$ m/s). La distribuzione degli ipocentri del data set sia per quanto riguarda le coordinate orizzontali sia le profondità (Fig. 1.3) è da considerarsi stabile. Il metodo di localizzazione ed il modello 3D utilizzato per questa analisi verranno applicate anche ai dati discussi sopra.

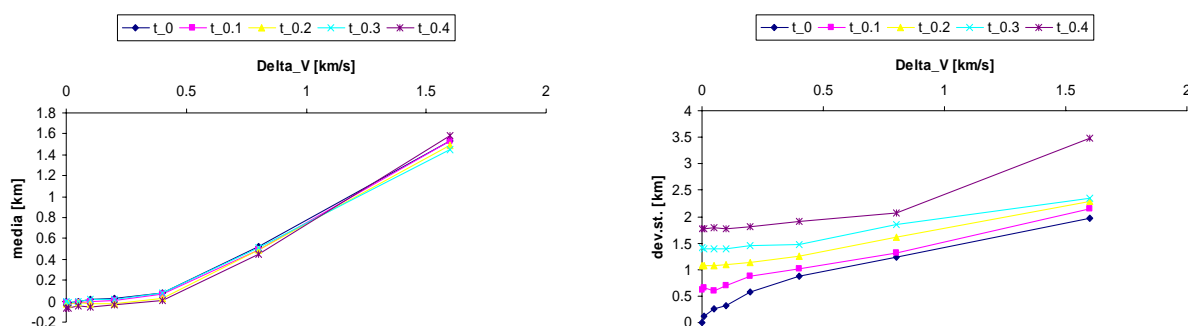


Fig. 1.3. Effetto della perturbazione casuale dei parametri di ingresso per la localizzazione, (a) media su tutto il data set 2002-2003, (b) deviazione standard. Si mostrano i risultati per le profondità, poiché le incertezze per le coordinate epicentrali sono inferiori.

1.3 Valutazione sullo stato di avanzamento

Si ritiene che lo stato di avanzamento è da valutare "partially fulfilled" in quanto si è riusciti comunque a formulare una legge di attenuazione per lo spostamento massimo del suolo, ovvero i parametri D5 e D10. Ulteriori analisi riguarderanno l'uso di localizzazioni con il modello 3D con la procedura NONLINLOC, che saranno disponibili entro breve termine. I risultati verranno aggiornati qualora si dovessero verificare ulteriori eventi di rilevanza. Inoltre si intende eseguire ulteriori confronti dei dati osservati con le simulazioni numeriche.

1.4 Motivi che hanno ostacolato l'avanzamento

Il data set inizialmente a disposizione era povero di eventi con magnitudo $M_L \geq 3.0$. Nel corso del progetto questo problema si è parzialmente risolto in quanto si sono verificati ulteriori terremoti con $M_L \geq 3.0$. (per esempio durante gli sciami sismici avvenuti in Ottobre 2005 e Gennaio 2006).

1.5 Pubblicazioni

Tuvè, T., Mostaccio, A., Langer, H., Di Grazia, G., 2005. Re-evaluation Of The Shallow Seismicity On Mt Etna Applying Probabilistic Earthquake Location Algorithms. Poster presentato al Fall Meeting of the American Geophysical Union, San Francisco, Dicemmnber 9-15, 2005.

Giampiccolo E., Langer H., Patanè D., Tusa G., 2006. Peak Ground Motion Attenuation relation-ship at Mount Etna volcano (Italy), Poster presentato all'Assembly of the European Geophysical Union, Vienna, April 2 – 7 , 2006.

1.6 Bibliografia

- Chapman, C., 2003. Fundamentals of Seismic Wave Propagation. Cambridge Univerisity Press, 608 pp.
- Giampiccolo, E., D'Amico, S., Patanè, D., Gresta, S., 2006. Attenuation and source parameters of shallow microearthquakes at Mt. Etna volcano. Submitted to Bull. Seism. Soc. Amer.
- Hirn, A., Nercessian, A., Sapin, F., Ferrucci, F., Wittlinger, G., 1991. Seismic heterogeneity of Mt. Etna: structure and activity. Geophys. J. Int., 105, 139-153.
- Lomax, A., J. Virieux, P. Volant, and C. Thierry-Berge (2000). Probabilistic earthquake location in 3D and layered models, in Advances in Seismic Event Location, C. H. Thurber and N. Rabinowitz (Editors), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 101–134
- Müller, G., 1985. The reflectivity method: a tutorial. J. Geophys., 58, 153-174.
- Patanè, D., Ferrucci, F., Gresta, S., 1993. Leggi di scala r parametri di sorgente per terremoti all'Etna. 12° Con. Ann. GNGTS, 925-928.
- Richter, C. F., 1958. Elementary Seismology. W. H. Freeman & Company, San Francisco, London, 767 pp.
- Ungerer, J.1990. Berechnung von Nahfeldseismogrammen mit der Reflektivitätsmethode. Tesi di Laurea, Universität Stuttgart, 161 pp.

2 UR 2: INGV Roma1

2.1 Obiettivi

La UR 2 contribuisce alle seguenti attività:

- Comportamento dell'SRS per sorgente vicina (Task 3);
- Modello di attenuazione dello SRS per i terremoti italiani (Task 4);
- Analisi parametriche di onde di lungo periodo generate localmente in bacini sedimentari (Task 5b).

Si sottolinea che la UR ha portato a compimento la realizzazione di tutti i principali obiettivi fissati per la prima fase del progetto. L'esposizione delle attività procederà in ordine di Task.

2.2 Stato di avanzamento

2.2.1 Comportamento dell'SRS per sorgente vicina (Task 3).

Il modello semplificato dello SRS proposto da Faccioli et al. (2004) è basato su uno spettro adimensionale che utilizza come norma la durata del segnale t_0 per i periodi ed il massimo dello spostamento (d_{max}) per le ampiezze dello spettro. Se le leggi predittive di questi due parametri sono conosciute in funzione della magnitudo e della distanza, è quindi possibile sfruttare questa semplice ed immediata definizione per conoscere lo SRS in tutto lo spazio magnitudo – distanza. L'assunzione principale sottintesa in questa definizione è una forma d'onda temporale dello spostamento semplice, simile ad un impulso. Lo scopo di questo task è di studiare la stabilità e la variazione di questa assunzione quando la distanza dalla faglia è piccola (qualche lunghezza di faglia), laddove diversi fenomeni di sorgente come la direttività, il campo vicino (spostamento statico) o il meccanismo focale sono molto influente.

Per studiare questi effetti, abbiamo realizzato un piccolo studio parametrico sintetico utilizzando il codice di calcolo in campo completo con una sorgente estesa di Liu e Spudich (2002). La geometria utilizzata è rappresentata nella Figura 2.1. Il dispositivo corrisponde a 121 ricevitori (11x11) equidistanti e spazati 10

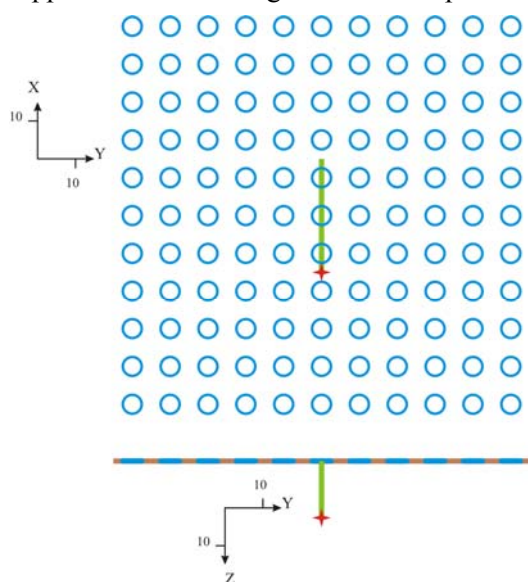


Fig. 2.1: geometria utilizzata in questo studio. In alto, la geometria vista dall'alto. In basso una sezione YZ.

km (cerchi blu). La faglia (in verde) ha uno strike verso Nord (componente X). In questo primo anno, la magnitudo è stata mantenuta costante e uguale a 6.5 con un stress drop di 3 MPa. La faglia risultante ha una lunghezza di 30 km e una larghezza di 14 km. Il bordo superiore della faglia arriva a 1 km di profondità. Il mezzo di propagazione è omogeneo. Siccome siamo interessati solo alle basse frequenze (inferiore a .3 Hz), abbiamo potuto scegliere una velocità di scivolamento costante sulla faglia con un'apodizzazione della dislocazione ai bordi per eliminare eventuali fasi di arresto. I parametri della discretizzazione del problema sono stati scelti per assicurare una stabilità numerica fino a 0.8 Hz.

Sono state effettuate 36 simulazioni facendo variare il meccanismo focale, la posizione della nucleazione e il rapporto fra velocità di rottura e velocità delle onde S, per un totale di 13000 tracce sintetiche in spostamento.

Il primo passo è stato la verifica se l'assunzione di una forma d'onda semplice di tipo impulso sia valida in queste condizioni. Le forme d'onda incontrate possono essere classificate in tre categorie che dipendono

principalmente dalla componente e dalla posizione del ricevitore. La prima categoria è composta da segnali dominati da uno spostamento statico importante, vicino allo spostamento massimo. In questo caso, lo SRS è diverso dallo spettro di riferimento : sale in ampiezza fino ad 1 al periodo normalizzato 1 e rimane quasi costante. Questi segnali si trovano all'interno di una regione limitata intorno alla faglia ($r < L/2$). La seconda categoria corrisponde a casi molto particolari di abbinamento fra meccanismo focale e posizione del ricevitore. In questi casi, la forma d'onda assomiglia ad un doppio impulso, uno positivo e l'altro negativo.

Lo SRS subisce un aumento forte prima del periodo t_0 , fino ad un'ampiezza pari a due volte d_{\max} . Questi segnali sono pochi. L'ultima categoria, la più diffusa, è una combinazione fra un impulso ed un spostamento statico inferiore a d_{\max} . Lo SRS in questi casi assomiglia allo spettro di riferimento.

Per studiare la dipendenza di d_{\max} e t_0 in funzione della direttività e del meccanismo focale, abbiamo scelto come variabile l'angolo di vista (θ), cioè l'angolo nel piano orizzontale fra lo strike della faglia e il vettore sorgente-ricevitore. L'angolo θ è uguale a 0° nella direzione dello strike. La definizione stessa dell'angolo θ implica la definizione di un punto di riferimento che rappresenta la faglia. Questo punto è anche necessario per definire la distanza, parametro che entra nell'equazione predittiva dello spostamento massimo. La definizione di questo punto di riferimento non è triviale e molte sono le proposte riportate in letteratura. Nel nostro studio abbiamo fatto il paragone fra due possibili posizioni: il punto di nucleazione (l'ipocentro) ed il centro geometrico della faglia. La rappresentazione di $d_{\max}(\theta)$ mostra una minore dispersione soprattutto intorno a $\theta=0^\circ$ quando il punto di riferimento corrisponde al centro della faglia. Abbiamo quindi scelto quest'ultima definizione.

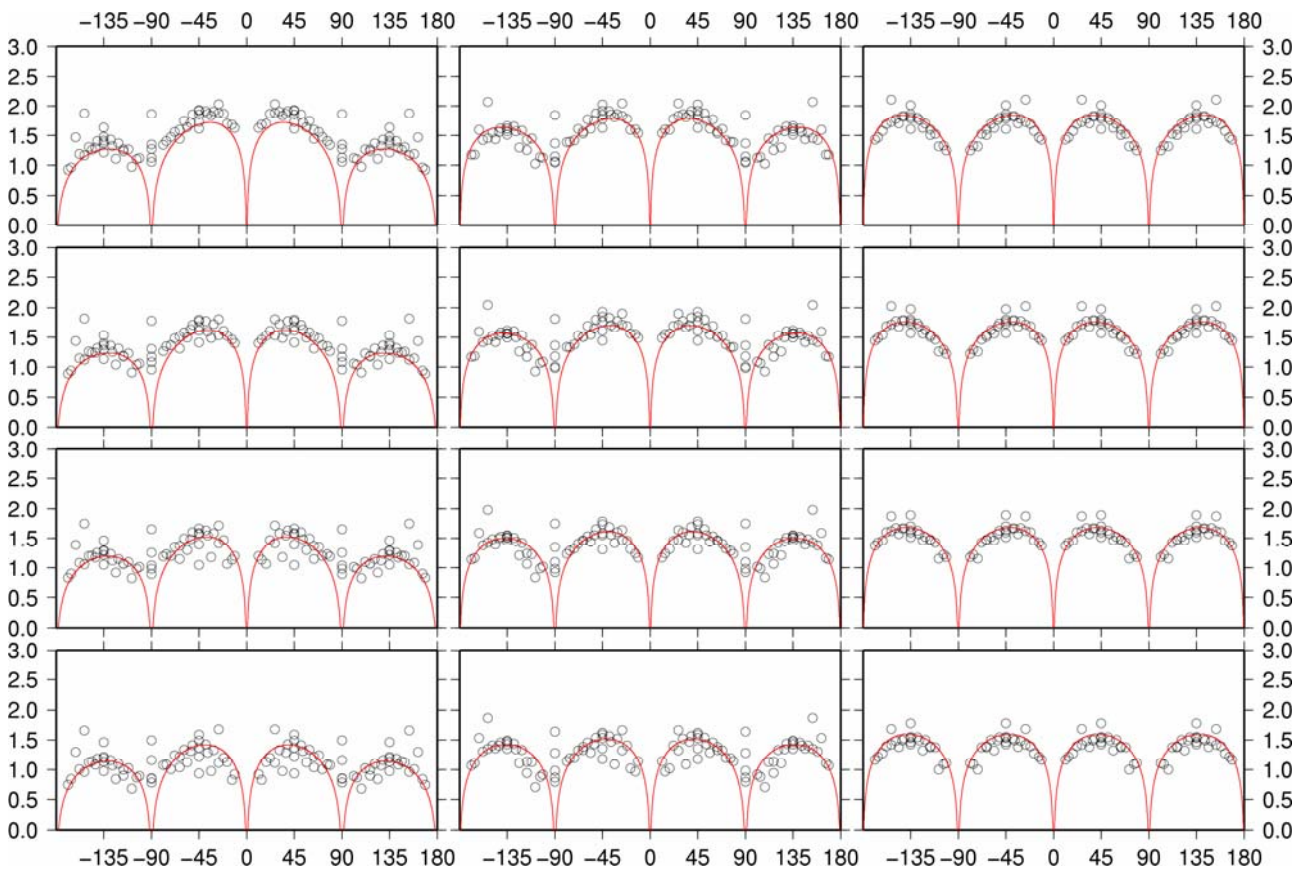


Fig. 2.2 : variazione di $\text{Log}(d_{\max}) + \text{Log}(r_c)$ in funzione di θ per un meccanismo focale strike slip, componente Z. Ogni pannello corrisponde ad una rottura particolare. La linea rossa corrisponde all'equazione predittiva proposta in questo studio.

Poiché cerchiamo una variazione intorno alla formulazione di Faccioli et al. (2004), abbiamo ammesso che la dipendenza di d_{\max} in funzione della distanza (r_c) sia semplicemente collegata alla dispersione geometrica. Abbiamo quindi lavorato sulla quantità $\text{Log}(d_{\max}) + \text{Log}(r_c)$ che dipende unicamente dalla magnitudo. Per ogni scenario, abbiamo rappresentato questa quantità in funzione di θ_c . La fig. 2.2 mostra questa quantità sulla componente verticale nel caso di un meccanismo strike slip. Ogni grafico corrisponde ad una combinazione particolare di velocità di rottura (v_r) e di posizione della nucleazione (ξ). Quando $\xi=0$, la nucleazione è unilaterale verso Nord (prima colonna nella fig. 2.2) mentre quando $\xi=1$, la rottura è puramente bilaterale (ultima colonna nella fig. 2.2). La colonna centrale corrisponde a $\xi=0.5$. Abbiamo simulato quattro velocità di rottura diverse (0.6β , 0.7β , 0.8β e 0.9β). La riga in basso nella fig. 2.2 corrisponde alla velocità più bassa e la riga in alto alla velocità più rapida. Ogni piccolo cerchio rappresenta un segnale temporale.

La fig. 2.2 mette in evidenza la grande variazione di d_{\max} (più di un ordine di grandezza) in campo vicino. Essa è principalmente dovuta ad effetti di direttività e pattern di radiazione. L'effetto dell'estensione della faglia non sembra influente. Infatti abbiamo verificato che, per una distanza $r_c \gg L/2$, l'errore commesso usando un'assunzione di sorgente puntiforme è inferiore a 5% per quanto riguarda la direttività e il pattern di radiazione. Usando formule classiche per la direttività e formulazioni semplificate per il pattern di radiazione, abbiamo sviluppato la equazione seguente predittiva:

$$\text{Log}_{10}(d_{\max}) + \text{Log}_{10}(r_c) = \underbrace{M_w - 4.3}_{\text{Faccioli et al. (2004)}} + a + \underbrace{\text{Log}_{10}(f_R(\theta))}_{\text{meccanismo focale}} + \underbrace{\text{Log}_{10}(fd(\theta, v_{app}, \xi))}_{\text{direttività}} \pm \sigma$$

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

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

I parametri a e b , e la funzione f_R sono rappresentati nella tabella in funzione del meccanismo focale e della componente. La seconda colonna mostra la deviazione standard nel caso in cui si consideri solo il primo termine dell'equazione predittiva, che corrisponde alla proposta di Faccioli et al. (2004). La formulazione proposta mostra un netto miglioramento soprattutto per le componenti verticali. Uno dei problemi rimane la definizione della componente orizzontale (H). Abbiamo scelto di prendere la somma quadratica per limitare la dispersione. Infatti, se si considera la somma geometrica, la dispersione dovuta a questa scelta è superiore alla dispersione dovuta alla direttività o al pattern di radiazione. Un'altra possibilità sarebbe di separare il movimento orizzontale in movimento parallelo e perpendicolare alla faglia.

	Faccioli et al. (2004)		Inserendo meccanismo focale e direttività			
	a	σ	a	b	f_R	σ
Strike slip Z	-0.755	0.27	-0.577	0.708	$\text{Sin}(2\theta)$	0.15
Strike slip H	0.038	0.16	0.307	0.475	-	0.11
Dip slip Z	-0.416	0.30	-0.304	0.942	$\text{Sin}(\theta)$	0.19
Dip slip H (hw)	-0.192	0.27	-0.070	0.778	$\text{Sin}(\theta)$	0.18
Dip slip H (fw)			0.141			

L'unico caso in cui abbiamo dovuto separare il dato in funzione del foot wall (fw) e l'hanging wall (hw) corrisponde alla componente orizzontale per un meccanismo dip slip. È interessante notare che abbiamo dovuto solo intervenire sul parametro a , poiché la forma dell'equazione predittiva in funzione di θ è la stessa da una parte e dell'altra della faglia.

Per quanto riguarda t_0 , nessuna variazione chiara è stata osservata. Questo parametro rimane costante in funzione di θ intorno ad un valore abbastanza elevato (10 s). Questo comportamento può essere spiegato con la definizione che abbiamo utilizzato per stimare t_0 , cioè il tempo fra l'inizio del segnale e il tempo finale corrispondente ad una ampiezza inferiore al 5% di d_{\max} . In questo caso, la durata del segnale è controllata dalla durata dei termini del campo vicino, che non subiscono effetto di direttività.

Gli obiettivi di questo Task sono stati completati al 90%. Manca la verifica della stabilità dell'equazione predittiva in funzione della magnitudo.

2.2.2 Attenuazione di D_{10} in Italia (Task 4).

Sono state analizzate 254 registrazioni digitali delle componenti orizzontali di 17 terremoti con magnitudomomento $4.0 < M_w < 6.0$, costituite per il 90% da accelerogrammi della Rete Accelerometrica Nazionale (Servizio Sismico) ed il 10% da velocigrammi (sismometri a larga banda Trillium 40 s) della Rete Sismica Nazionale dell'INGV. La fig.2.3 mostra gli intervalli di magnitudo e distanze ipocentrali coperti dall'insieme dei dati dei terremoti analizzati.

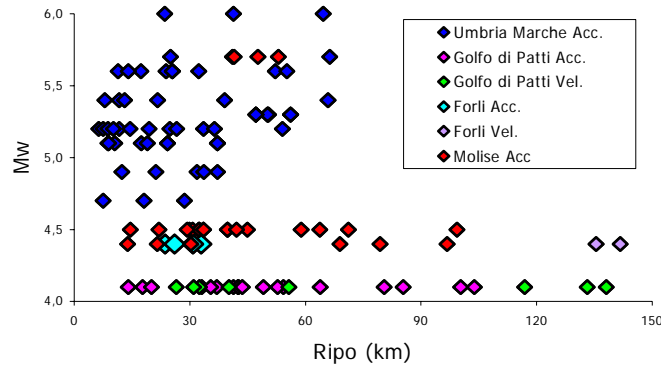


Fig. 2.3 – Base di dati italiani, distribuzione rispetto a magnitudo-momento e distanza ipocentrale.

Si è posta una particolare attenzione nel valutare le incertezze derivanti dalla procedura di integrazione, soprattutto per gli accelerogrammi. A questo scopo, si sono utilizzate contemporaneamente 4 diverse tecniche numeriche in grado di fornire la serie temporale di spostamento (Fig. 2.4). La prima tecnica fa uso del codice BASCO (realizzato presso il Politecnico di Milano, cortesia di Roberto Paolucci) per la correzione della linea di base. Questo codice è stato appositamente modificato e reso più veloce con una ricerca automatica dei parametri ottimali con approccio “grid search”. Una seconda tecnica effettua un filtraggio numerico con filtro Butterworth acausale prima della doppia integrazione. La frequenza di taglio è scelta sulla base del rapporto segnale/rumore, tenendo anche sotto controllo lo spettro di Fourier in spostamento per verificare la consistenza delle ampiezze a bassa frequenza con il momento sismico del terremoto. Una terza tecnica elimina il trend non fisico a bassa frequenza risultante dalla doppia integrazione dell’accelerogramma mediante un fit polinomiale. La quarta tecnica elimina le distorsioni sulle onde S in spostamento derivanti dal basso segnale/rumore insito nelle fasi P mediante l’applicazione di una funzione “taper” che azzerà le ampiezze prima della fase S. Il parametro che viene calcolato da ogni serie temporale è D_{10} , il valore dello spettro di risposta in spostamento al periodo di 10 s con smorzamento del 5%. La media tra le due componenti orizzontali è calcolata come $\sqrt{D_{NS} D_{EW}}$.

Il calcolo della serie temporale di spostamento è la fase più critica dell’intero task: ogni singola integrazione viene presa attentamente in considerazione prima di essere accettata. Non sempre i risultati di ogni tecnica vengono accettati: ad esempio, se il filtro passa-alto non ha una frequenza di taglio minore di 0.05 Hz l’opzione filtraggio viene esclusa. Analogamente se una delle altre tecniche non corregge adeguatamente la serie in spostamento, almeno per periodi inferiori a 10 s. In fig. 2.4 viene visualizzato il confronto tra i segnali di spostamento ottenuti con le diverse tecniche, e analogamente vengono confrontati i relativi SRS.

E’ interessante osservare che talvolta, a fronte di marcate differenze nelle diverse serie temporali, gli spettri mostrano differenze trascurabili, almeno per $T < 10$ s.

Per ogni forma d’onda, il valore risultante di D_{10} viene stimato dalla media tra i valori ottenuti con le diverse tecniche, assumendo una distribuzione lognormale di D_{10} . Tale operazione di media fornisce anche una deviazione standard che, passando agli antilogaritmi, definisce l’intervallo di incertezza statistica per ogni forma d’onda da attribuire alla tecnica di integrazione. Dall’analisi dell’intero set dei dati è risultato che l’incertezza causata dalla procedura è pari a circa il 15%, mentre la dispersione del dato calcolato attraverso la media delle due componenti è circa del 43%. Ciò significa che il “bias” introdotto dalla scelta della tecnica di integrazione è comunque trascurabile rispetto alla variabilità intrinseca di D_{10} .

La Fig. 2.5 mostra il risultato ottenuto per D_{10} dall’analisi del set dei dati disponibili per l’Italia. Il numero limitato di registrazioni non consente il calcolo di una regressione con buona affidabilità. Tuttavia viene osservata una stretta consistenza tra l’andamento dedotto dall’UR3-INGV-MI (Task 1) su scala mondiale ed i dati italiani, almeno per magnitudo $M_w > 4$.

I deliverables D14 (6 mesi) e D15 (12 mesi) possono considerarsi definitivamente compiuti.

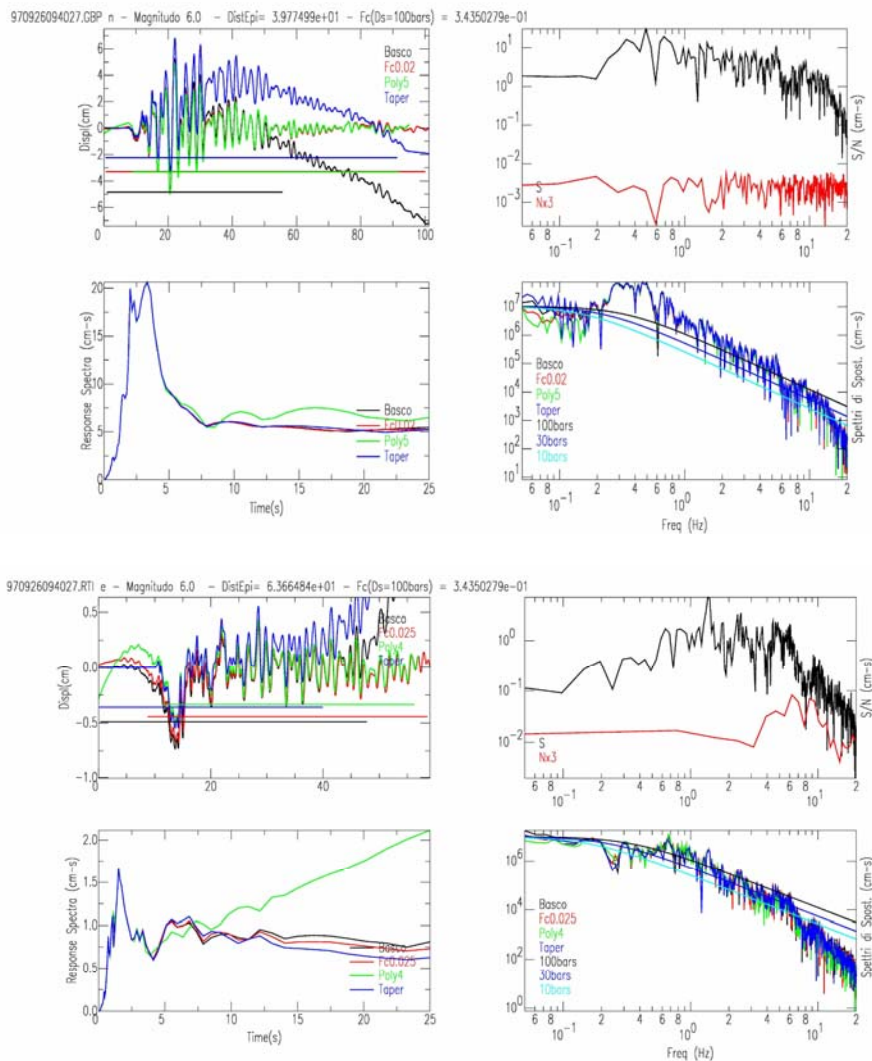


Fig. 2.4 – Risultati di SRS ottenuti con diverse procedure, con visualizzazione dei vincoli imposti in termini di rapporto segnale/rumore e spettri di Fourier di spostamento.

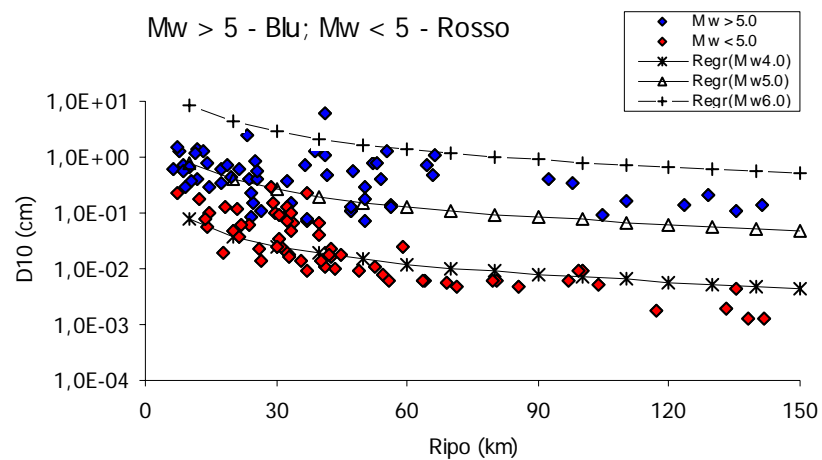


Fig. 2.5 – I valori trovati per D_{10} sono confrontati con l'andamento trovato nel Task 1 sulla base dati mondiali.

2.3 Analisi parametriche di onde di lungo periodo generate localmente nei bacini sedimentari (Task 5).

Le attività svolte in questo task mirano a valutare come gli SRS calcolati in siti su roccia (Task 3, si veda paragrafo 2.1 di questa relazione) debbano essere modificati per siti all'interno di estesi bacini caratterizzati da coperture sedimentarie con struttura di velocità variabile. Si è impostato uno studio parametrico attraverso modellazioni numeriche 2D in cui si fanno variare il contrasto di impedenza, l'angolo di incidenza del fronte d'onda, la pendenza del bordo. Con questo approccio viene simulata la risposta dei diversi modelli a un fronte d'onda piano incidente. L'input è costituito da un impulso ortogonale al piano nel caso di onde SH e polarizzato orizzontalmente nel piano nel caso di onde P-SV. Si è utilizzata la procedura di calcolo WISA, realizzata nell'ambito di una collaborazione INGV-CASPUR (<https://thor.caspur.it>). La risposta all'input "delta-like" lungo il bacino viene poi convoluta con le serie temporali di spostamento calcolate nel Task 3, nei due casi di meccanismo trascorrente e di faglia inversa.

Il risultato della convoluzione fornisce lo spostamento simulato lungo il profilo del bacino per i meccanismi di sorgente presi in considerazione. Per essere consistenti con l'ipotesi di fronte d'onda piano, si sono selezionate quelle condizioni in cui i sismogrammi sintetici del Task 3 mostravano, ortogonalmente al modello, variazioni trascurabili (<20%) entro punti della griglia a distanze pari alla lunghezza della faglia. Le situazioni studiate sono relative a faglia trascorrente (moto ortogonale al piano) e faglia inversa (moto nel piano).

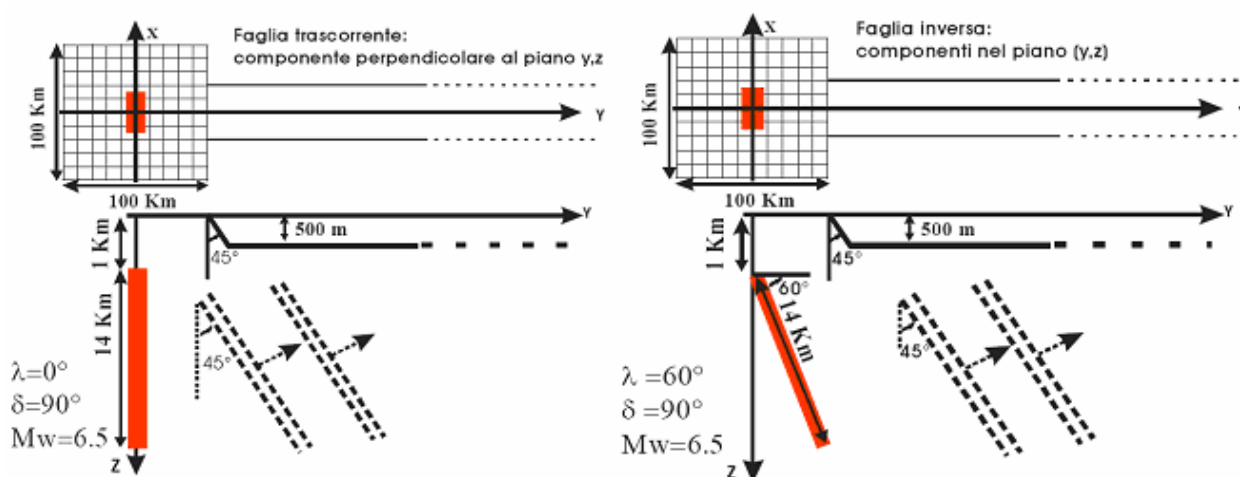


Fig. 2.6 - Schema che illustra la griglia utilizzata nel Task 3, la giacitura del bacino rispetto alla faglia (in rosso), e l'incidenza del fronte d'onda (meccanismo trascorrente a sinistra, meccanismo inverso a destra).

Preliminarmente, si è costruito un modello semplificato per la taratura della procedura per onde SH e P-SV (Fig. 2.6). Tale modello è stato caratterizzato dalla presenza di uno strato a più bassa velocità rispetto al basamento roccioso. Questo rappresenta una semplificazione del problema, che poi verrà trattato nella sua generalità adottando il profilo di velocità "canonico" suggerito nell'ambito del progetto SISMOVALP per i bacini Appenninici. Si è simulata in questa fase un'incidenza del fronte d'onda di 45° , con una pendenza del bordo di 45° . Incidenza del fronte d'onda e pendenza del bordo saranno successivamente variati con lo studio parametrico. La Fig. 2.7 mostra il modello semplificato utilizzato per i test iniziali, con i parametri che lo caratterizzano. I triangoli indicano i siti del bacino per i quali sono state stimate le variazioni dello spettro di risposta in spostamento rispetto allo spettro su roccia. La Fig. 2.8 mostra come lo spettro di risposta in spostamento si modifica a diverse distanze dal bordo per il caso SH ed SV. A causa dell'eccitazione dei modi superiori, le maggiori amplificazioni si osservano per periodi minori del periodo fondamentale di risonanza 1D (T_{1D}). Queste modifiche degli SRS andranno comunque considerate solo nei casi in cui i periodi interessati siano maggiori di T_D per non interferire con lo spettro di accelerazione di normativa. Dalle simulazioni preliminari risulta che per $T > T_{1D}$ le amplificazioni si attestano su valori mediamente compresi tra 2 e 1.

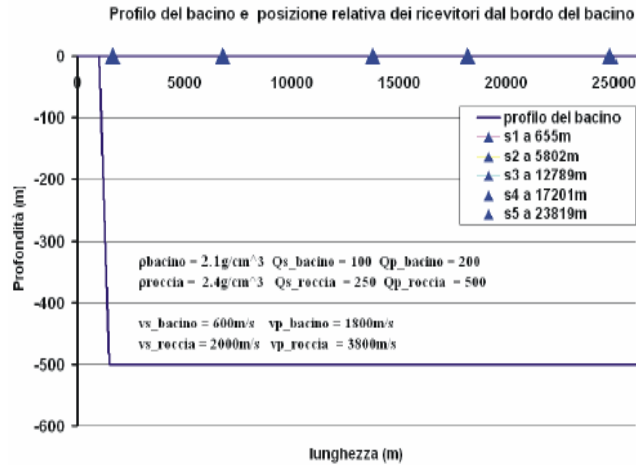


Fig. 2.7 – Schema del modello numerico, con proprietà dei materiali e posizione dei ricevitori lungo il bacino.

Va tuttavia ribadito che le simulazioni finora effettuate riguardano casi non rappresentativi di modelli di velocità realistici (è stato usato uno spessore di 500 m di depositi alluvionali con velocità costante) e che quindi bisognerà attendere i nuovi modelli prima di giungere a qualsivoglia conclusione.

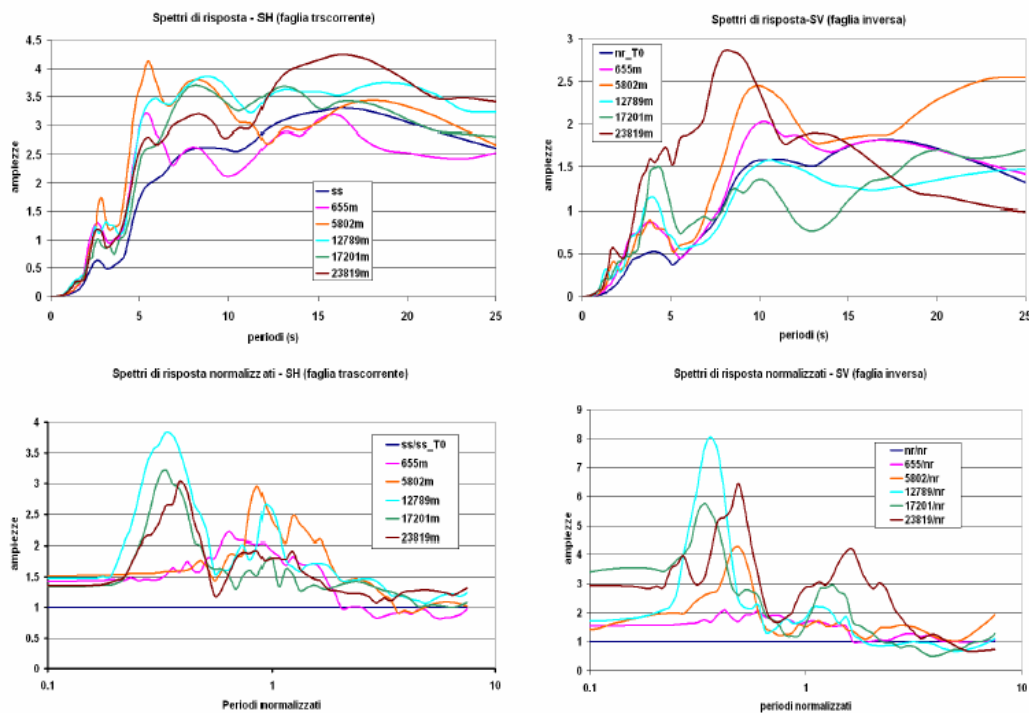


Fig. 2.8– Nei riquadri in alto sono mostrate le variazioni dello SRS lungo il bacino, a diverse distanze dal bordo per onde SH (a sinistra) e SV (a destra), lo spettro su roccia è indicato con la curva blu. I riquadri in basso normalizza. Dalle mostrano il rapporto tra gli SRS nel bacino rispetto alla roccia e i periodi sono normalizzati rispetto al periodo fondamentale di risonanza 1D.

Il deliverable D17 (6 mesi) è definitivamente concluso. Il deliverable D18 (12 mesi) è stato realizzato al 75%.

2.4 Pubblicazioni

A. Herrero, G. Cultrera, A. Piatanesi, A. Rovelli, A. Cirella, E. Tinti and I. Hunstad (2006). Directivity influence on displacement response spectra at low frequency in near source range, SSA annual meeting, San Francisco.

3 UR 3: INGV Mi

3.1 Obiettivi

La UR 3 ha come obiettivo principale il realizzare la rappresentazione in mappa della pericolosità sismica del territorio italiano in termini di spettro di risposta di spostamento (SRS, Task 6). Inoltre, essa contribuisce in misura significativa anche alle seguenti attività:

- Perfezionamento del modello di riferimento per lo SRS (Task 1);
- Analisi parametriche di onde di lungo periodo generate localmente nei bacini sedimentari (Task 5b).

Si sottolinea che la UR ha pienamente centrato la realizzazione di tutti i principali obiettivi fissati per la prima fase del progetto. Per ragioni di sequenza logica, l'esposizione procederà in ordine di Task.

3.2 Stato di avanzamento

3.2.1 Contributi al perfezionamento del modello di riferimento (Task 1)

Il contributo principale al Task 1 è stata l'elaborazione della relazione di attenuazione per l'ordinata SRS a $T=10$ s, denotata D_{10} , identificata dal progetto come parametro di ancoraggio dello stesso SRS e di rappresentazione della pericolosità sul territorio. Si è usata, per coerenza con le tendenze più recenti, la media geometrica delle ordinate spettrali relative alle due componenti orizzontali del moto, ovvero $D_{10}=[SRS_x(10) \times SRS_y(10)]^{1/2}$. La scarsità di dati strong motion di qualità adeguata disponibili per l'Italia da un lato, e la necessità di pervenire a una relazione di attenuazione il più robusta possibile fino a magnitudo M_w 7.2 e distanze di 150 km (v. par. 2.3) dall'altro hanno inoltre praticamente imposto di fare uso di una base di dati mondiale, verificando a posteriori in collaborazione con la UR2 (Task 4) la compatibilità con le tendenze evidenziate dagli scarsi dati italiani disponibili.

La relazione di attenuazione $D_{10} = f(M_w, R_i, sito)$ è stata determinata a partire da registrazioni accelerometriche digitali relative a 64 terremoti, per un totale di 1685 valori osservati di D_{10} . L'intervallo di taratura per la regressione comprende indicativamente distanze ipocentrali $10 \leq R_i \leq 150$ km e $5 \leq M_w \leq 7.2$. I dati sono in prevalenza di origine giapponese (registrazioni della rete K-Net), per terremoti con profondità focale inferiore a 22 km. In termini di categoria di suolo, con riferimento all'Eurocodice 8 e alle norme italiane, la composizione dei dati è in Tabella 1. Le classi A e B, sono state unite in un'unica categoria, in base ai principali risultati ottenuti dalla UR6, che evidenziano come gli effetti di amplificazione su suolo di classe B siano modesti (variabili tra il 5% e il 10%) e di fatto assimilabili a quelli di classe A.

Tabella 1 - Composizione della base di dati mondiale in termini di condizioni di sito.

Categoria di suolo	n° dati
A	64
B	709
C	651
D	138
Sconosciuta	123

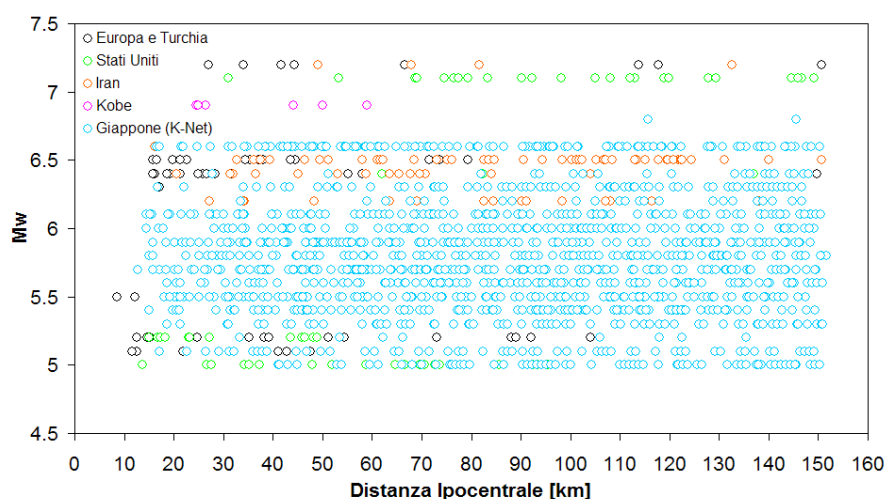


Figura 1 - Base di dati mondiale, distribuzione rispetto a magnitudo e distanza.

La regressione è stata effettuata in due passi (Joyner e Boore, 1981) in modo da disaccoppiare la dipendenza dalla distanza ipocentrale R_i (determinata al primo passo della regressione) dalla dipendenza dalla magnitudo momento M_w (determinata al secondo passo). Inizialmente non è stata operata alcuna distinzione per le categorie di suolo nelle stazioni accelerometriche. Si è adottata dapprima la forma,

$$\log D_{10} = C_1 + C_2 M_w + C_3 R_i + C_4 \log R_i \quad (1)$$

ottenendo un valore del coefficiente di attenuazione anelastica C_3 molto prossimo a zero e non statisticamente significativo. Posto quindi $C_3=0$, si è pervenuti all'espressione

$$\log D_{10} = -4.12 + 1.02 M_w - 1.06 \log R_i \quad \sigma_{\log D_{10}} = 0.28 . \quad (2)$$

I residui, calcolati come rapporto tra il valore osservato e quello predetto, non presentano alcuna tendenza rispetto a distanza e magnitudo. Sono state poi considerate esplicitamente 3 categorie di suolo, definite come da Eurocodice 8 e norme sismiche italiane: A+B (raggruppate in base alle analisi condotte da UR6), C e D, attraverso l'introduzione di due variabili logiche, S_1 e S_2 , che valgono rispettivamente: 0, 0 per siti A+B; 1, 0 per siti C; 1, 1 per siti D. Assumendo che le stazioni con categoria di suolo sconosciuta, v. Tab. 1, ricadano tutte in A+B, si ottiene:

$$\log_{10} D_{10} = -4.31 + 1.04 M_w - 1.04 \log_{10} R_i + 0.10 S_1 + 0.23 S_2 \pm 0.27 \quad (3)$$

in ottimo accordo con il modello di riferimento FRP04 (Faccioli et al. 2004) per caduta di sforzo $\Delta\sigma=3\text{MPa}$:

$$\log_{10} d_{\max} = -4.3 + M_w - \log_{10} R_i . \quad (4)$$

Lo studio svolto ha portato a compimento i deliverables D1 (6 mesi) e D2 (12 mesi).

3.2.2 Task 5: Contributi ad analisi parametriche in bacini sedimentari

La UR 3 ha contribuito al Task 5 con due tipi di attività: 1. Individuazione e classificazione di bacini e valli suscettibili di amplificazione anomala ai lunghi periodi per effetto di onde di superficie, e 2. Analisi di risposta sismica 2D di bacini con criteri parametrici, iniziando dal caso reale della piana di Gubbio.

* Individuazione e classificazione di bacini e valli sedimentarie

I vincoli per la definizione e l'individuazione di bacini e valli a scala nazionale sono fondamentalmente rappresentati da (i) aree a pendenza nulla (Figura 2 (a)), sufficientemente estese e (ii) simultanea presenza di depositi sedimentari. L'identificazione degli elementi è fortemente legata alla scala d'indagine: l'analisi topografica è basata su un modello digitale SRTM della NASA¹ (Fig. 2 (b)), mentre la carta geologica è quella informatizzata, a scala 1:500.000, del Servizio Geologico. 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 fluvioacustri e fluvioglaciali, spiagge attuali, alluvioni terrazzate (Olocene), depositi eolici (Olocene, Pleistocenici pro-parte)). Le analisi sono state effettuate in ambiente GIS.

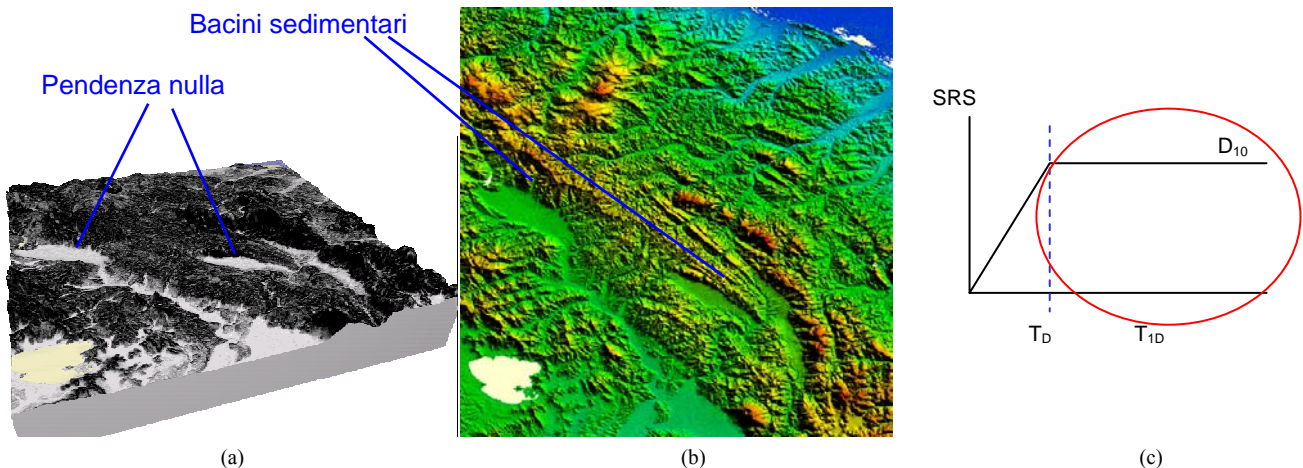


Figura 2 – (a) Due esempi di pendenza nulla, (b) dati DEM SRTM, e (c) definizione area di studio S5.

¹ <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>

Si potrebbe in prima approssimazione ipotizzare che la dimensione in piano minima W_{min} di interesse di un bacino sia 1.0 -1.5 km: per sedimenti aventi mediamente $V_S = 400$ m/s e un periodo dominante minimo di interesse di 1 s, si avrebbe un lunghezza d'onda di 400 m, e dovrebbero servire almeno 2-3 lunghezze d'onda per registrate effetti significativi legati alla propagazione orizzontale.

Però, nell'ottica di S5, la dimensione di interesse di un bacino dipende soprattutto dalla sismicità; infatti, deve essere T_{1D} (periodo fondamentale di vibrazione 1D per il massimo spessore di sedimenti) $> T_D$ (Fig. 2 c)). T_D discende dalle analisi probabilistiche, per ogni zona e periodo di ritorno, e risulta $\lambda_D = T_D * V_S = 4h$ (h = profondità massima dei sedimenti). Poiché nella maggior parte dei casi pratici $2h/W \leq 0.25$ (Chávez-García e Faccioli, 2000), risulta $W_{min} = 2 (T_D * V_S)$. In Fig. 3 è l'esempio della piana di Gioia Tauro, dove l'analisi di pericolosità fornisce $T_D = 3.5$ s (per periodo di ritorno 475 anni); se $V_S = 500$ m/s mediamente per tutta la piana, risulta $W_{min} \geq 3.5$ km, chiaramente soddisfatta.

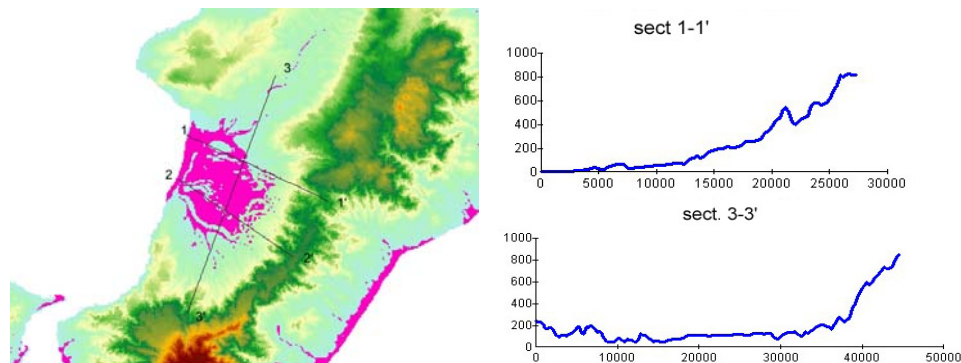


Figura 3 - Piana di Gioia Tauro: individuazione tramite GIS dell'area di bacino (in rosa) e relative sezioni

* Analisi di risposta sismica 2D di valli e bacini

Si indaga con strumenti numerici l'influenza di onde di lungo periodo, generate ai bordi di valli e bacini, sull'andamento degli SRS a periodi $> 1-2$ s. Vengono in particolare eseguite dalla UR3 analisi 2D con metodi numerici ad elementi spettrali e tecniche di *sub-structuring* del dominio di calcolo (Bielak et al. 2003, Faccioli et al., 2005), su valli chiuse, in parallelo a quelle su valli chiuse da un solo lato condotte con programmi alle differenze finite (UR2). L'approccio usato da UR3 comprende, da un punto di vista metodologico, i seguenti passi:

- creazione di un modello numerico "locale" ad elementi spettrali che racchiude la valle in questione;
- analisi della sorgente e calcolo del campo di moto completo indotto nell'area di interesse, mediante il metodo asintotico dei numeri d'onda di Hisada (1994 e 1995). Questo fornisce un'efficiente soluzione analitica del moto sismico nel campo vicino alla faglia in un mezzo terrestre orizzontalmente stratificato visco-elastico, con esplicita considerazione dei termini statici (dislocazioni permanenti dovuti alla rottura di faglia) e dinamici;
- ricostruzione dell'eccitazione dinamica da applicare al modello locale, sotto forma di forze efficaci al contorno, funzioni delle dislocazioni indotte dalla sorgente e delle proprietà del mezzo a contatto con la valle;
- risoluzione del problema numerico mediante codice Else, ad elementi spettrali (Maggio et al. 2001);
- studio degli SRS in punti (ricevitori) di superficie nella valle e loro rapporto rispetto a SRS in punti di riferimento su roccia esternamente alla valle;
- confronto con analisi 1D e con dati osservati (ove possibile).

Questo approccio sarà usato nello studio parametrico di valli e bacini, variando i dati (geometria del bacino e caratteristiche della sorgente) entro intervalli realistici.

Lo studio parametrico viene impostato sulla base dei risultati ottenuti in una prima analisi svolta sulla piana di Gubbio, modellando la scossa principale della sequenza di Umbria-Marche del 1997 (26.9.97, ore 9.40, M_w 6). Tale analisi ha permesso di focalizzare gli aspetti da tenere maggiormente in considerazione nello studio dei bacini.

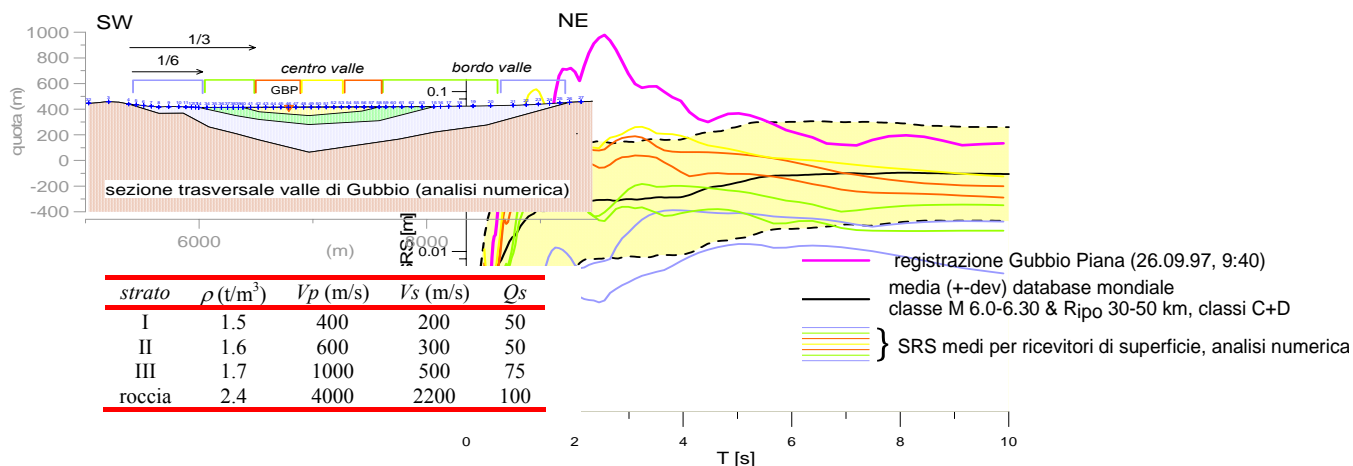


Figura 4 - Analisi numerica per la sezione trasversale della piana di Gubbio. A sinistra: schema del modello numerico con proprietà dei materiali. A destra: confronti tra osservazioni e risultati numerici.

La Fig. 4 mostra uno schema del modello della sezione trasversale del bacino (passante per la stazione accelerometrica di Gubbio Piana, GBP), con la stratigrafia adottata, e alcuni dei risultati ottenuti.

In particolare si mostrano gli SRS medi calcolati lungo la superficie del bacino, distinti in base alla loro posizione (blu e verde per il ‘*bordo valle*’, giallo e rosso per il ‘*centro valle*’). Insieme si è rappresentato lo spettro della registrazione di GBP e l’involuppo delle osservazioni dal database mondiale, per tipo di suolo C+D. Come si può osservare, l’amplificazione della risposta sui sedimenti è assai significativa: al centro valle gli spettri “bucano” l’SRS medio e la sua fascia di dispersione per periodi compresi tra 1 e 2 s. Le analisi indicano 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). Il valore di T_{1D} segna certamente un limite superiore all’intervallo dei periodi da studiare. 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.

Il deliverable D17 può considerarsi completato al 90% con riferimento alla definizione delle configurazioni geologiche e delle sorgenti (parte (a)), mentre la parte (b), riguardante le prime analisi 2D per la valutazione degli effetti di amplificazione dei bacini, è stata completata.

3.2.3 Rappresentazione della pericolosità sismica

Obiettivo del Task 6 è la costruzione di mappe probabilistiche della domanda sismica sul territorio italiano mediante lo SRS. Le analisi statistiche svolte dalla UR6 sulle forme medie degli SRS della base di dati mondiale (v. par. 2.1) mostrano che lo spettro può essere ben approssimato da una forma bilineare con un primo ramo crescente linearmente con il periodo e un secondo ramo costante. Per fissare l’ordinata di tale ramo si è scelto il valore D_{10} , al posto dello spostamento di picco del suolo (d_{MAX}), considerando che per il territorio italiano D_{10} approssima bene lo SRS per lunghi periodi fino a M_w 7 o poco maggiore (in base agli spettri medi osservati). Il modello proposto, riportato in Fig. 5, si basa sulla formulazione dell’Eurocodice 8 (CEN 2004) ripresa dalle norme sismiche italiane (Ordinanza PCM 3431, 2005), ed è tale che:

per $T < T_C$ SRS è trascurabile

per $T_C < T < T_D$ $SRS = a_g \cdot S \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C T}{(2\pi)^2}$

per $T > T_D$ $SRS = D_{10}$

dove

- D_{10} è il valore ottenuto dalla relazione di attenuazione descritta nel par. 2;
- T_D è un valore non fissato risultante dall'intersezione dei due rami dello spettro (che dipende quindi da magnitudo e distanza).

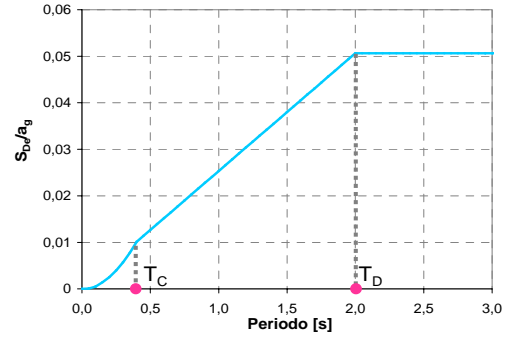


Figura 5 – Modello dello spettro bilineare di riferimento.

Si noti che per $T > T_D$ la proposta di Fig. 5 semplifica, rendendolo costante, il modello SRS assunto nell'Eurocodice 8 (Parte 1, Annex A). Nella prima fase sono stati affrontati i deliverables D20 (6 mesi), per valutare gli strumenti di calcolo delle mappe probabilistiche in termini di SRS, e D21 (12 mesi). Su quest'ultimo, oltre ai criteri relativi agli effetti dei bacini sedimentari (v. par. 2.2.2), si è soprattutto focalizzata l'indagine sul modo di includere nell'analisi probabilistica il perfezionamento del modello di riferimento (Task 1) costituito dallo spettro bilineare.

Un primo importante compito è consistito nell'individuare, con analisi per disaggregazione, gli intervalli di M_W e R_{epi} di applicabilità della relazione di attenuazione per D_{10} (Task 1). Le analisi in questione, condotte nell'ipotesi di processo stocastico poissoniano di occorrenza degli eventi, hanno usato in ingresso i parametri stabiliti per la mappa di pericolosità in accelerazione (geometrie delle ZS, catalogo parametrico e relativi intervalli di completezza, parametri della Gutenberg – Richter e tassi di occorrenza per ogni ZS) (Gruppo di Lavoro 2004). Dopo un'indagine preliminare con la relazione di attenuazione di FPR04 per individuare le coppie magnitudo–distanza che maggiormente influenzano la pericolosità in spostamento e, conseguentemente, gli intervalli di applicabilità della relazione di attenuazione, si sono ripetute le stesse analisi con la nuova relazione di cui al Task 1 (v. par 2). Si sono considerati sistematicamente diversi siti del territorio italiano, e in Fig. 6 si mostrano per alcuni di essi le coppie (M_W , R_{epi}) che dominano la pericolosità. Come secondo compito, si sono condotte, mediante il programma di calcolo CRISIS2003², indagini preliminari sull'influenza del modello di processo di occorrenza (Poisson/terremoto caratteristico) e del modello di zone e sorgenti sismogenetiche, prendendo come regione di riferimento l'Arco Calabro. Vi sono presenti (Fig. 7) le 2 zone sismogenetiche ZS929 e ZS930, e 5 aree sismogenetiche (AS) in DISS3.

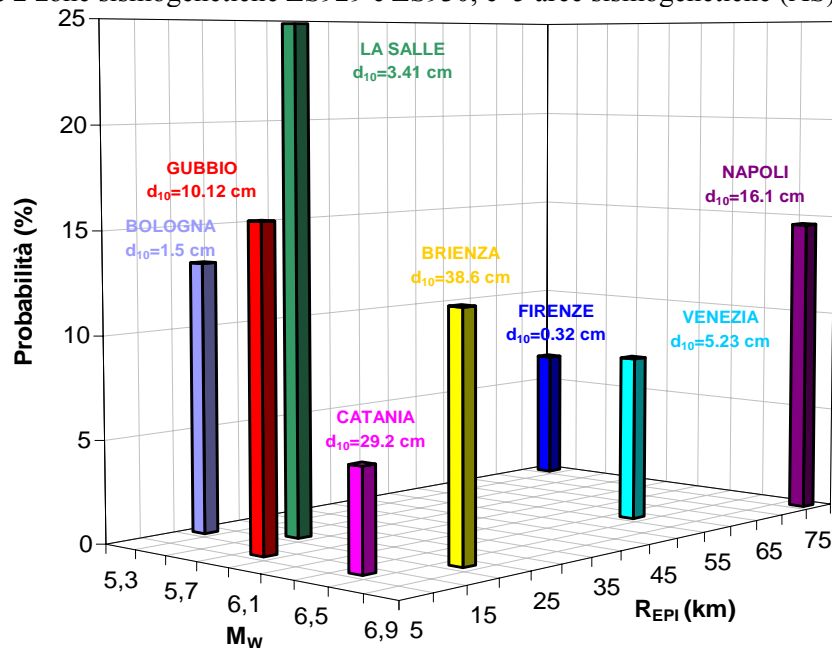
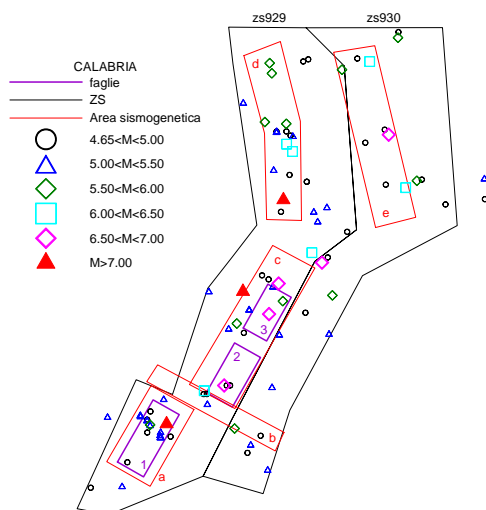


Figura 6 – Analisi per disaggregazione della pericolosità: ogni barra misura il contributo alla pericolosità (in %) della coppia (M , R_{EPI}) che ha maggiore influenza sul sito indicato, del quale è anche dato lo spostamento a 10 s (d_{10}).

² CRISIS2003 Ver. 3.0.1, Program for Computing Seismic Hazard, M. Ordaz et al., UNAM, Città del Messico 2003.



Area Sismogenetica	H _{MAX}	H _{MIN}	Slip rate	M _{MAX}
a – Messina Straits	12	3	0.9 ... 2.0	7.2
b – Aspromonte	12	3	0.1 ... 1.0	6.0
c – Southern Calabria	12	3	0.1 ... 1.0	6.9
d – Crati Valley	12	8	0.1 ... 1.0	7.0
e – Eastern Sila	12	8	0.1 ... 1.0	6.6

FAGLIA	T medio	Slip rate	M _{CARAT}
1 – Messina Straits	700-1500	0.93 – 2.0	7.0
2 – Gioia Tauro Plain	860 – 8600	0.1 – 1.0	6.6
3 – Mesima Basin	1090 - 10900	0.1 – 1.0	6.6

ZS	λ	β	M _{MIN}	M _{MAX}
Zs929	0.17	1.888	4.76	7.29
Zs930	0.17	2.256	4.76	6.60

Figura 7 – Arco calabro: ZS 929 e 930 ed eventi dal CPTI04. 1, 2, 3 sono le faglie geologicamente e geofisicamente ben definite in DISS3, mentre le lettere da a ad e indicano le aree sismogenetiche (v. dati nelle tabelle).

Si sono formulate tre ipotesi (con risultati confrontati in Fig. 8 in termini di D_{10} – periodo di ritorno, per il sito di Messina, preso come esempio):

1. ZS puramente poissoniane: i dati per le ZS sono quelli usati per la mappa di accelerazione (GdL 2004).
2. Modello di Poisson associato alle ZS per le magnitudo più basse e un modello di terremoto caratteristico (Ordaz et al. 1991) per gli eventi a maggior magnitudo associato alle singole faglie. Per i parametri di sismicità si è seguita la procedura classica escludendo ovviamente l'evento corrispondente al terremoto caratteristico.
3. Sismicità attribuita alle sole aree sismogenetiche (AS): si sono considerati solo gli eventi all'interno delle AS descritte dal DISS3 o associabili ad esse. La sismicità è tutta poissoniana per le AS Aspromonte, Southern Calabria, Crati Valley, e Eastern Sila, per l'eccessiva incertezza degli *slip rates* sulle faglie, mentre per la AS Messina Straits è poissoniana fino a M 5.5 e un terremoto caratteristico è associato alla faglia dello Stretto. I risultati indicano la mancanza di prudenzialità dell'ipotesi poissoniana ai lunghi periodi di ritorno.

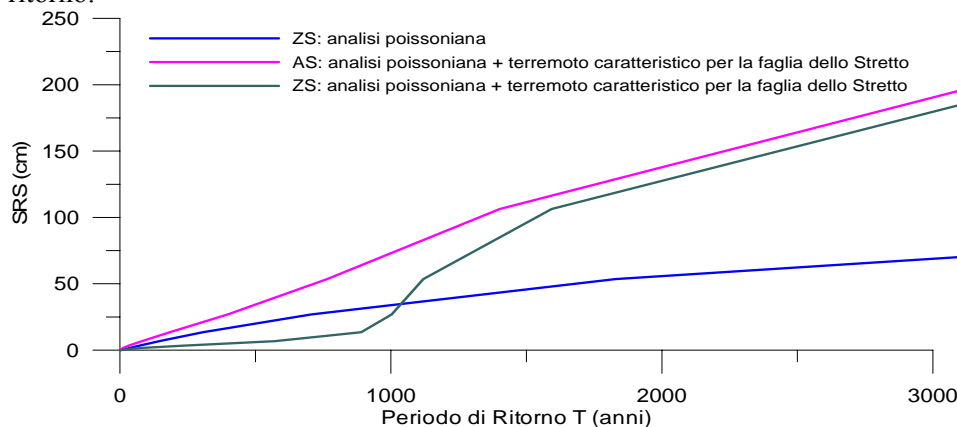


Figura 8 - Confronto delle curve D_{10} – T risultanti dalle tre analisi di pericolosità per il sito di Messina.

Come terzo compito si sono eseguite prove preliminari con il modello di spettro SRS bilineare, cercando di verificare il modello in due passi: 1) per un dato sito si è effettuata un'analisi per disaggregazione in D_{10} onde individuare la coppia M, R_i che domina la pericolosità; 2) con CRISIS2003 e ZS poissoniane si è svolta anche un'analisi di pericolosità in accelerazione [con la relazione di attenuazione di Ambraseys et al. (1996) modificata per distanze epicentrali, Montaldo et al. (2005)] e in spostamento (con la relazione di attenuazione del par. 2.1) onde individuare rispettivamente i valori di a_g e D_{10} per il periodo di ritorno prescelto. Lo spettro bilineare è stato costruito pertanto attraverso tali valori e successivamente confrontato con la forma spettrale media osservata su base mondiale per le classi di magnitudo e distanza contenenti la coppia dominante nel sito in esame. Lo studio è stato condotto per due regioni sismicamente assai diverse: Arco Calabro e Alpi Occidentali. La Fig. 9 mostra, come esempio, a sinistra la mappa di pericolosità di D_{10}

per 475 anni, per l'Arco Calabro; a destra si vede invece il confronto descritto per un sito della regione in esame. L'accordo con gli involuপি dalle osservazioni è molto buono per la gran parte dei siti considerati.

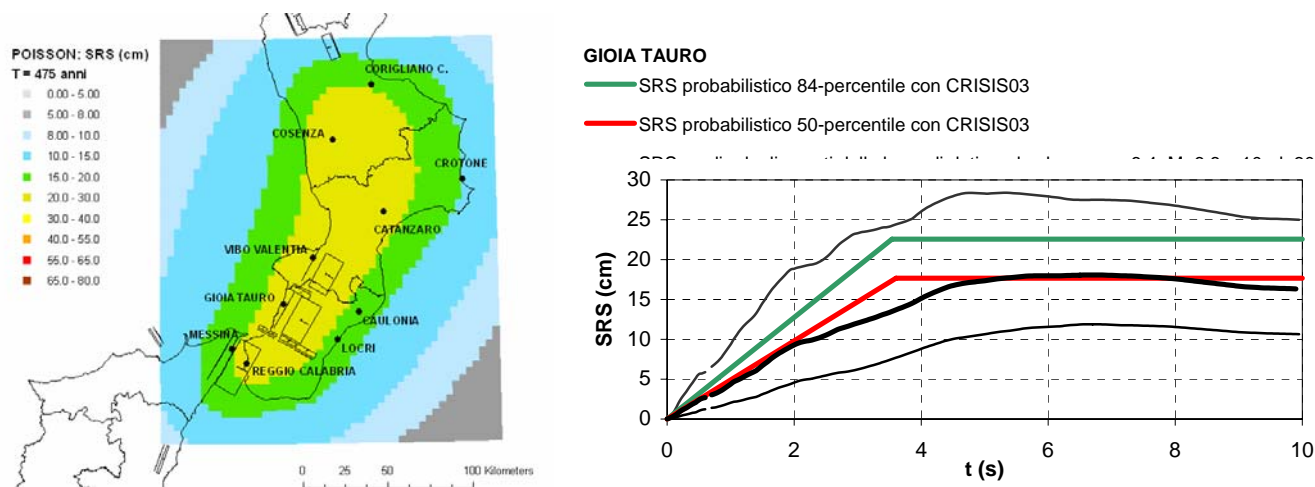


Figura 9 – Arco Calabro: pericolosità in D_{10} nell'ipotesi poissoniana sulle ZS929 e 930 per $T=475$ anni (a sinistra) e confronto dello SRS probabilistico bilineare con lo SRS medio dai dati mondiali nell'intervallo di M e R_i corrispondente alla coppia dominante la pericolosità al sito di Gioia Tauro.

Si è individuato, inoltre, un criterio preliminare per l'apporto di eventuali modifiche allo SRS su valli e bacini alluvionali attraverso il confronto tra gli involuপি degli spettri SRS osservati per opportune classi di M_W e R_i e quelli ricavati da simulazioni parametriche con modelli 2D, valutando se la risposta della valle simulata numericamente rientra nella fascia $m \pm 1\sigma$ delle forme spettrali ottenute dalla base di dati mondiale per una data classe di magnitudo e distanza, considerando in tal caso lo SRS bilineare (v. par. 2.2.2 e Fig. 4). Nel caso in cui, come in Fig. 4, la risposta numerica per alcuni punti della valle “buca” tale fascia si svilupperanno criteri più approfonditi per modificare il modello di riferimento, che rappresenterà in ogni caso il minimo della risposta.

Il deliverable D20 è stato realizzato, mentre l'attività sul D21 ha portato all'enunciazione dei primi criteri per considerare o meno i bacini come casi particolari nella determinazione dello SRS.

3.3 Bibliografia

- Ambraseys N.N., Simpson K.A., Bommer J.J. (1996), Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **25** (4), pp. 371-400.
- 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), pp. 817-824.
- 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.
- Chavez Garcia F., Faccioli E. (2000), Complex site effects and building codes: Making the leap", *Journal of Seismology*, **4** (1), pp. 23-40.
- DISS Working Group (2005), Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.0.1 INGV 2005 - <http://www.ingv.it/DISS/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.
- 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.
- Gruppo di Lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica (2004), INGV, Rapporto Conclusivo, <http://zonesismiche.mi.ingv.it/>.
- 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), pp. 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.
- 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.
- Maggio, F., Massidda L., Sabadell J., Siddi G. (2001), A parallel spectral element method for applications to computational mechanics, /Internal Report CRS4-TECH-REP-01/103/, CRS4, Italy.
- 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](#), *Journal of Seismology*, **9** (3), pp. 295-316.
- Ordinanza PCM 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 Ingenieria, UNAM, Mexico City.

4 UR 4: OGS Trieste

4.1 1. Obiettivi

L'attività della UR4 è focalizzata sulla modellazione degli spostamenti attesi nell'area della Pianura Padana (PP) e Veneto-Friulana (PV) dovuti ad eventi sismici medio-forti che si verificano ai margini dei bacini sedimentari profondi. Le modellazioni numeriche a partire da modelli strutturali 1D e 3D sono necessarie per la scarsità di osservazioni disponibili. Gli obiettivi principali sono: a) definire lo scuotimento in termini di spostamento atteso nel caso di eccitazione e propagazione di onde di superficie in bacino sedimentario profondo nell'intervallo di distanze 50 – 200 km, b) evidenziare possibili anomalie delle forme dello spettro in spostamento (SRS, Faccioli et al., 2004) per periodi da 1 a 10s utilizzando in questa prima fase modelli crostali 1D. Questi obiettivi sono stati raggiunti nel corso del primo anno.

4.2 Stato di avanzamento

4.2.1 Definizione di modelli crostali di riferimento

In questa prima fase parte dell'attività della UR4 è stata dedicata al reperimento di studi e dati per definire nel miglior modo possibile i modelli crostali da utilizzarsi nelle modellazioni in termini di velocità sismiche, attenuazione, e stratificazione. Particolare attenzione è stata dedicata alla sintesi delle proprietà fisiche del bacino sedimentario profondo e dei sedimenti plio-quadernari. In questa fase si è osservato che il principale contrasto di velocità S si trova all'interfaccia tra i sedimenti plio-quadernari e quelli miocenici profondi ($V_P=2.1$ km/s e $V_P=3.5$ km/s rispettivamente). La profondità di questa discontinuità in PP è variabile, e può raggiungere i 7-8 km (Doglioni, 1993). Mediamente tale discontinuità si assesta sui 3 km (Cassano et al., 1986) in PP e su 1.5 km in PV (vedi Figura 1).

Poiché le modellazioni riguardano distanze ipocentrali da 50 a 200 km, uno dei parametri di input più importanti è rappresentato dal fattore di qualità Q. Viste le analogie tra i diversi bacini sedimentari profondi abbiamo scelto di utilizzare un modello di Q simile al modello di Olsen et al. (2003) ottenuto dall'inversione di forme d'onda osservate nel bacino sedimentario di Los Angeles.

4.2.2 Scelta dei terremoti di riferimento per le modellazioni

La scelta delle zone sismogenetiche è stata operata considerando il catalogo CPTI ed il database di Valensise e Pantosti (2001). Per le modellazioni sono state scelte le zone della ZS9 che presentano i valori di M_{max} più alti ($M_{max}=6.6$) ed in particolare le zone del Friuli-Veneto Orientale (905), del Garda-Veronese (906) e della Garfagnana-Mugello (915).

4.2.3 Modellazioni

Nell'arco dei primi sei mesi sono state eseguite delle validazioni dei modelli strutturali (e.g. Correggio 1996) e delle simulazioni numeriche a sorgente puntiforme a partire dai modelli evidenziati in Figura 1.

Successivamente sono state effettuate modellazioni che contemplano una sorgente finita e modelli strutturali 1-D. Sono stati calcolati 4 diversi scenari per terremoti di magnitudo momento $M=6.6$. I terremoti di riferimento sono specificati al paragrafo 2.2. Oltre ai terremoti specificati è stato calcolato uno scenario supplementare per un modello strutturale di riferimento definito "Rock" (V_s minima in superficie = 2.25 km/s) da utilizzarsi come raffronto con gli altri modelli caratterizzati da coperture sedimentarie di un certo spessore (V_s minima = 0.6 km/s). Per ogni scenario sono utilizzati 156 ricevitori posti a diverse distanze ipocentrali e distribuiti per campionare in modo uniforme sia la parte al "foot wall" che quella posta nel "hanging wall" della faglia. Sono state inoltre utilizzate 3 diverse distribuzioni di slip con stress drop variabile tra 0.8 MPa e 3.2 MPa e 12 diversi punti di nucleazione per simulare la propagazione della rottura bilaterale ed unilaterale.

4.2.3.1 Risultati delle modellazioni con sorgente finita

In Fig. 2 sono mostrati i risultati, in termini di SRS, ottenuti dalla nostra UR (in rosso) per lo scenario che riguarda il modello strutturale di riferimento (Rock) confrontati con gli SRS medi osservati per la base accelerometrica digitale aggiornata (UR6 Politecnico Milano, Paolucci et al., comunicazione personale). Il confronto mostra che per distanze superiori a 75 km i risultati delle modellazioni sono consistenti con le osservazioni. La dispersione dei valori sembra anche essere ben controllata e molto simile a quella evidenziata nei dati forniti da UR6. E'

invece rilevante l'influenza della scalatura della sorgente sismica (D_{\max} e D_{mean} della distribuzione di slip) sulle distanze ipocentrali nel campo vicino alla sorgente (vedi Fig. 2 distanza 50-75km) .

In Fig. 3 sono mostrati gli SRS medi calcolati per diversi intervalli di distanza ipocentrale per i 4 diversi scenari. Come si può facilmente notare gli scenari Garda-Veronese e Garfagnana, che hanno in comune lo stesso modello strutturale (A in Fig.1) ma diverso meccanismo focale (rispettivamente faglia inversa e normale), mostrano rispetto ai valori ottenuti per gli scenari Veneto e Rock (entrambi faglia inversa) i massimi valori di SRS ed un periodo T_d caratteristico superiore a 11s. Un valore di T_d inferiore si osserva invece per lo scenario Veneto (7-8s). Questi valori di T_d elevati sono documentati anche per altri bacini sedimentari (e.g. Kanto e Osaka Basins). Gli SRS calcolati per gli scenari nel bacino sedimentario si allontanano dagli SRS derivati da UR6 utilizzando la base dati accelerometrica.

Per meglio evidenziare le differenze con gli SRS tipici definiti sulla base delle osservazioni, abbiamo graficato i rapporti tra gli SRS per gli scenari Garda e Veneto e gli SRS ottenuti dallo scenario Rock. Il risultato è mostrato in Fig.4. In realtà con l'eccezione della classe di distanze compresa tra 50 e 75 km il rapporto evidenziato tra gli SRS per lo scenario Garda e lo scenario Rock (Figura 4 pannello a sinistra) è vicino al valore 1 fino a quasi 10 s. Questo significa che il modello PP sembra differenziarsi dagli SRS di riferimento solamente per periodi superiori a 10s nella gran parte delle classi di distanza qui considerate. Maggiore dettaglio merita la classe di distanze tra 50 e 75 km dove comunque potrebbe assumere un ruolo rilevante la geometria 3D del bacino.

I rapporti tra gli SRS ottenuti per lo scenario Veneto rispetto e gli SRS dello scenario Rock (Figura 4 pannello a destra) mostrano invece un'amplificazione trascurabile fino a 5s. Gradualmente da 5s a 7s il rapporto diventa 2 fino a 10s. Questo vale per tutte le classi di distanze considerate e porta alla conclusione che terremoti forti in PV vengono risentiti maggiormente nell'intervallo di periodi considerato (1-10s) rispetto a terremoti simili che si verificano in PP.

4.2.4 Scelta della base accelerometrica digitale di riferimento per il confronto con i dati calcolati

Per validare i calcoli che sono stati eseguiti per periodi superiori ad 1 s e distanze tra 50 e 200 km si è deciso di utilizzare il dataset della rete accelerometrica Giapponese Kik-NET, ed in particolare i dati registrati dalle stazioni della rete localizzate all'interno dei principali bacini sedimentari profondi (Kanto e Osaka). Questa scelta è motivata dal fatto che PP e Kanto Basin hanno una struttura sedimentaria e crostale molto simile dal punto di vista dei parametri geofisici di interesse. Sono anche stati raccolti dati relativi al California Strong Motion Instrumentation Program (2001) dove sono stati osservati sismogrammi in spostamento che mostrano periodi di amplificazione molto simili a quelli osservati per PV.

4.3 Attività prevista nei prossimi 6 mesi

A breve periodo è prevista la realizzazione di uno scenario con un modello strutturale 3-D di PP per valutare l'effetto della geometria del bacino nell'intervallo di distanze ipocentrali da 50 a 100 km. E' inoltre in corso l'elaborazione dei dati osservati all'interno dei bacini sedimentari profondi per procedere in tempi brevi ad un confronto con le modellazioni.

4.4 Riferimenti bibliografici

- Cassano, E., Anelli, L., Fichera, R., and Cappelli, V., 1986. Pianura Padana – interpretazione integrata di dati geofisici e geologici. 73° Congresso Società Geologica Italiana, 29 settembre – 4 ottobre 1986, Roma.
- Doglioni, C., 1993. Some remarks on the origin of foredeeps. *Tectonophysics*, 228, 1-20.
- Faccioli, E., Paolucci, R. e Rey, J., 2004. Displacement spectra for long periods. *Earthquake Spectra*, 20, 2, 347-376.
- 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.
- Valensise, G., e Pantosti, D., 2001. Database of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy. *Annals of Geophysics*, 44, 180pp.

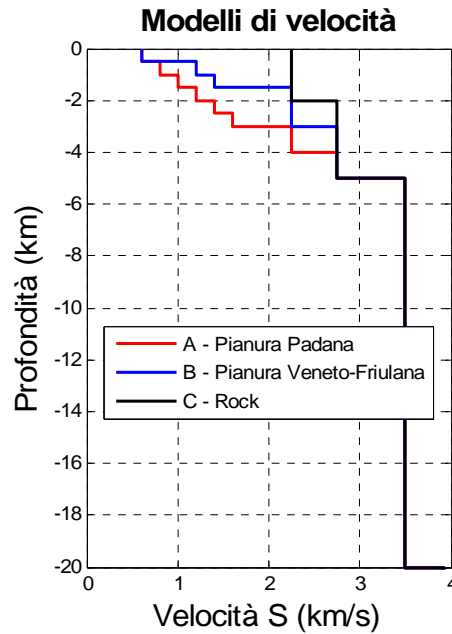


Fig. 1 – Velocità delle onde S per i diversi modelli strutturali utilizzati nelle modellazioni: Pianura Padana (A, rosso), Pianura Veneto-Friulana (B, blu), modello di riferimento “rock” (C, nero). Il modello A è stato utilizzato per gli scenari relativi ai terremoti Garda-Veronese e Garfagnana. Il modello B e C rispettivamente per gli scenari definiti “Veneto” e “Rock”.

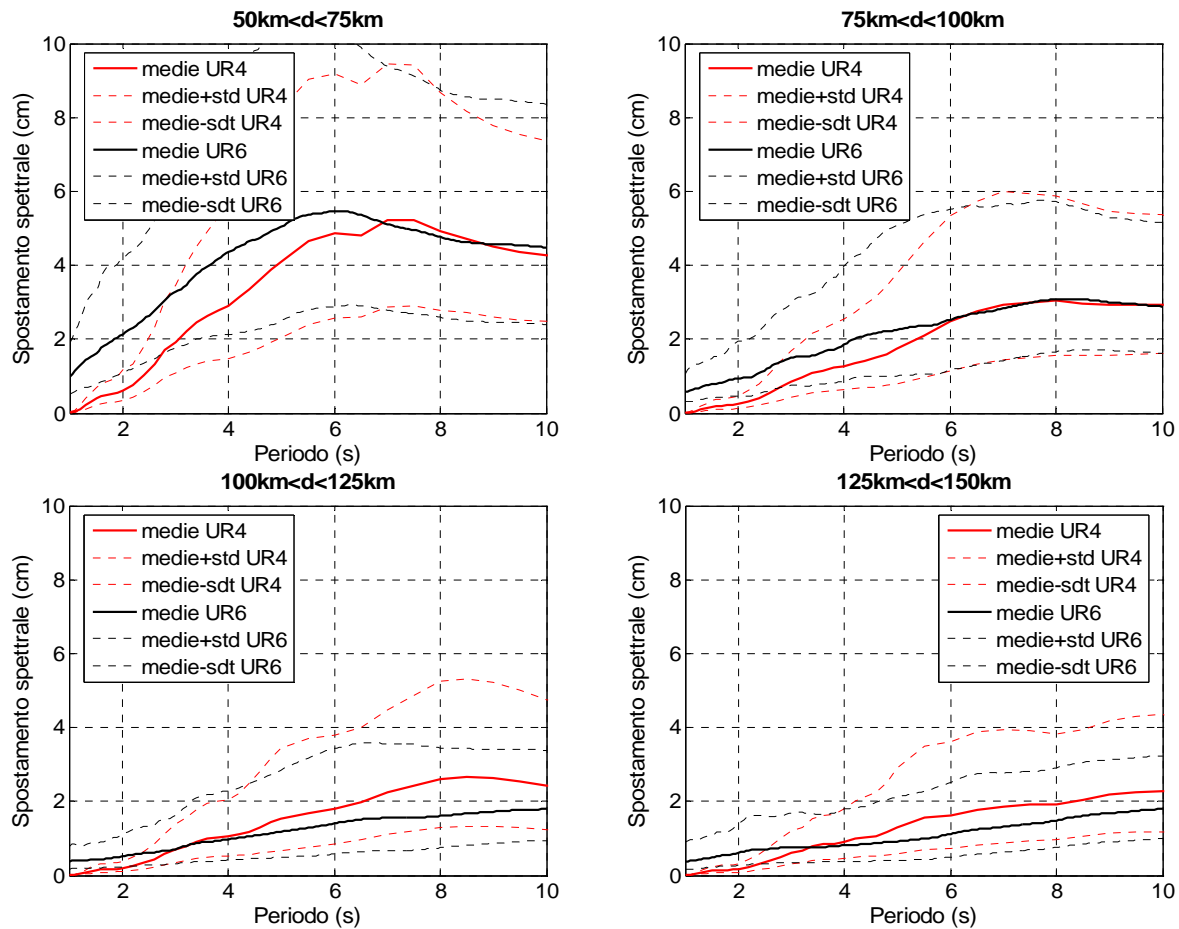


Fig. 2 – Confronto tra i valori medi in spostamento spettrale osservati da UR6 (base accelerometrica digitale aggiornata; Paolucci et al., comunicazione personale) ed i valori calcolati da UR4 per il modello definito “rock” (C in figura 1).

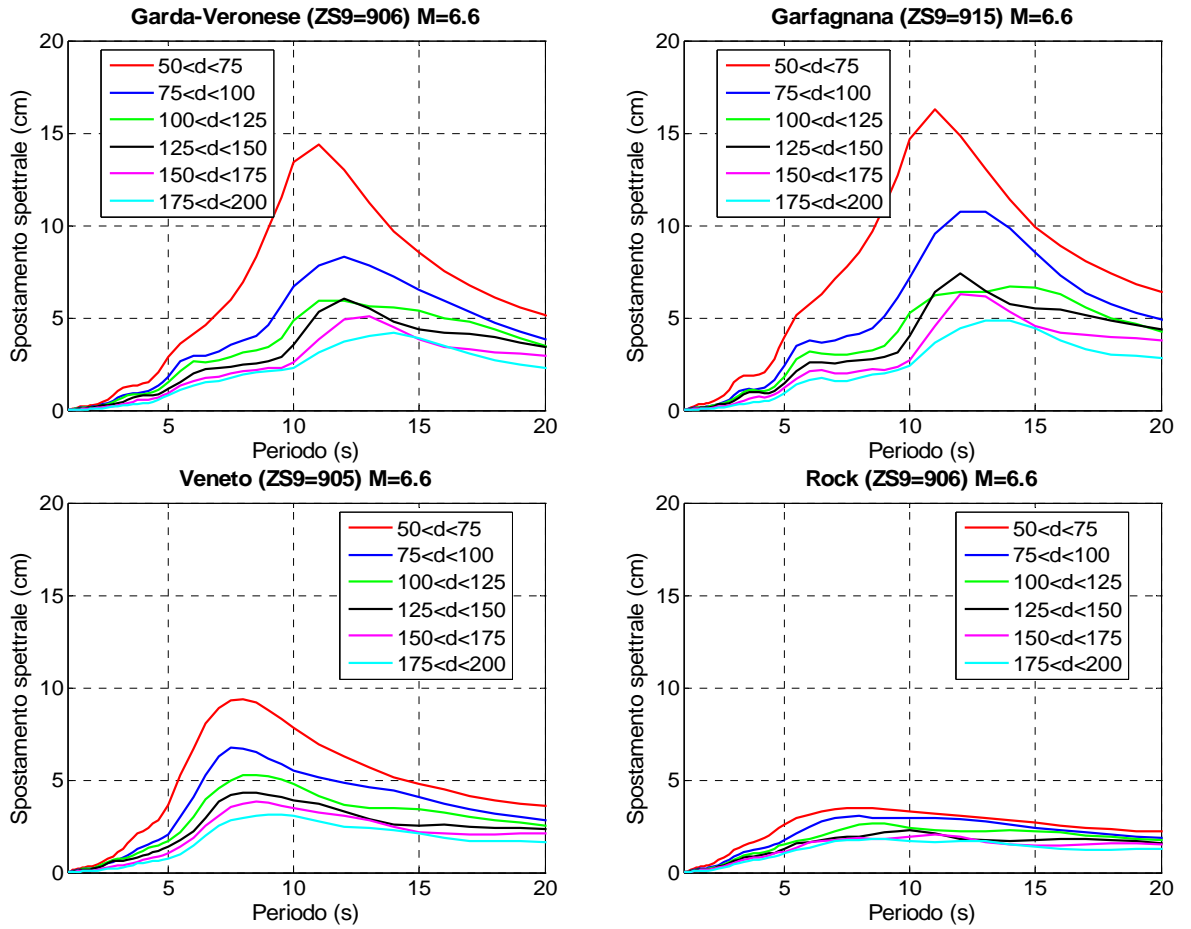


Fig. 3 – Forme spettrali in spostamento per i 4 scenari calcolati. Le curve degli spettri in spostamento rappresentano valori medi per le due componenti orizzontali a diverse distanze ipocentrali e calcolati considerando per ogni scenario 3 diverse distribuzioni di slip, 12 punti di enucleazione, 2 velocità di rottura.

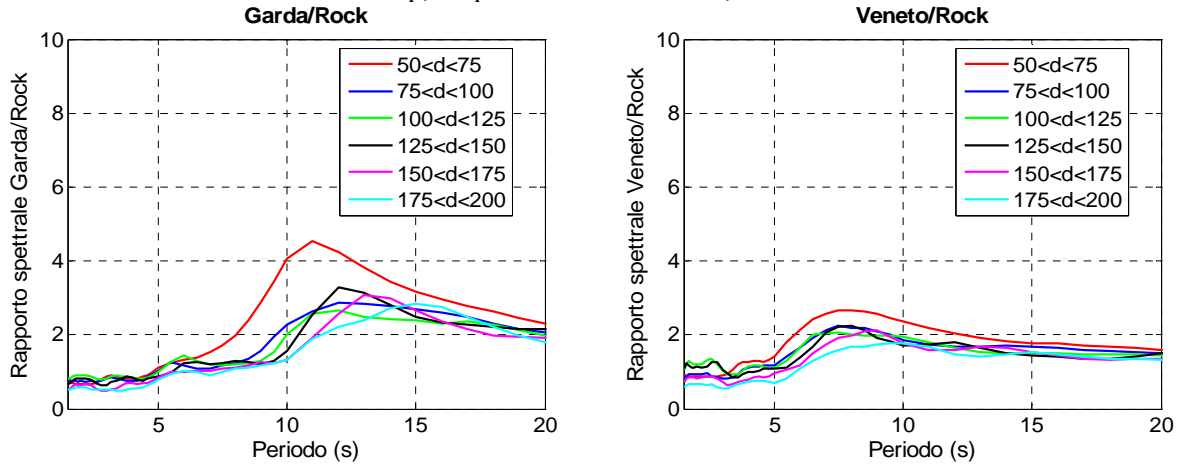


Fig. 4 – Rapporti tra gli spettri in spostamento medi calcolati a partire da un modello strutturale che include un bacino sedimentario profondo (A Pianura Padana in Figura 1) e gli spettri in spostamento ottenuti per il modello di riferimento “rock” (C). Rapporti spettrali tra le modellazioni Garda-Veronese e Rock (pannello a sinistra) e, rapporti spettrali tra Veneto e Rock (pannello a destra).

5 UR 5: OGS Trieste

5.1 Obiettivi

Produrre correlazioni di “attenuazione” con la distanza dello spostamento “massimo” corrispondente al periodo $T=10$ s negli spettri di risposta al 5% di smorzamento. Per “massimo” si intende ottenuto su base semiempirica attraverso il calcolo parametrico (modello “KF”) di scenari in spostamento rappresentativi di famiglie di sorgenti con diversi meccanismi di rottura, in varie zone del territorio italiano.

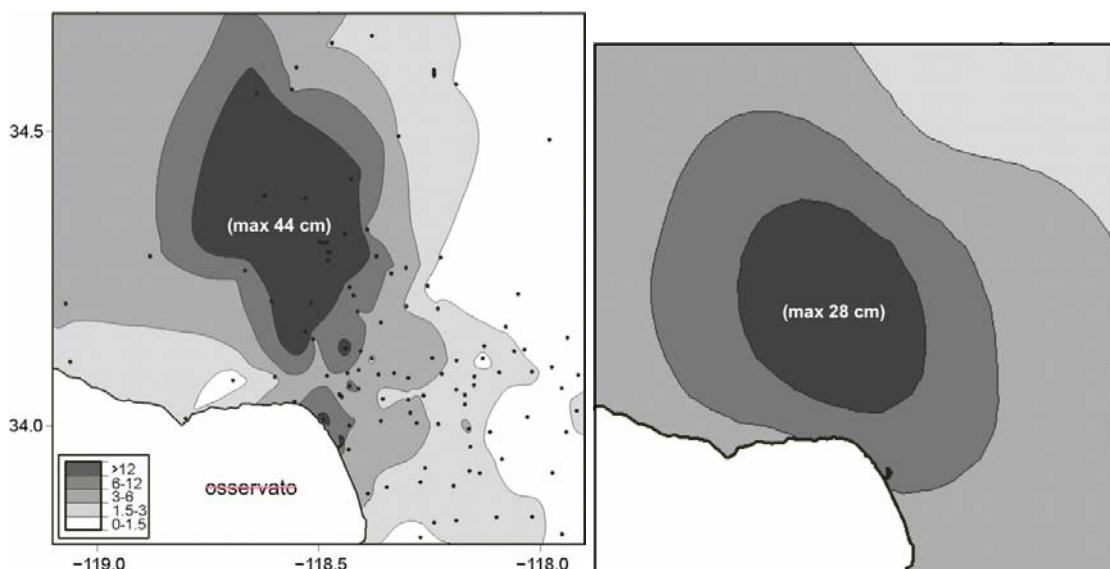
Premesse metodologiche del calcolo diretto di tali scenari parametrici sono: 1) che è preliminarmente necessario verificare l’efficacia dell’algoritmo in modalità inversa; ovvero che, nel caso di terremoti con buona dotazione di misure strumentali e di sorgente nota, l’algoritmo sia in grado di ritrovare la sorgente, almeno approssimativamente; 2) che “funzioni” la trasformazione intensità/spostamento, anche con riferimento alle diverse scale di intensità esistenti.

5.2 Stato di avanzamento

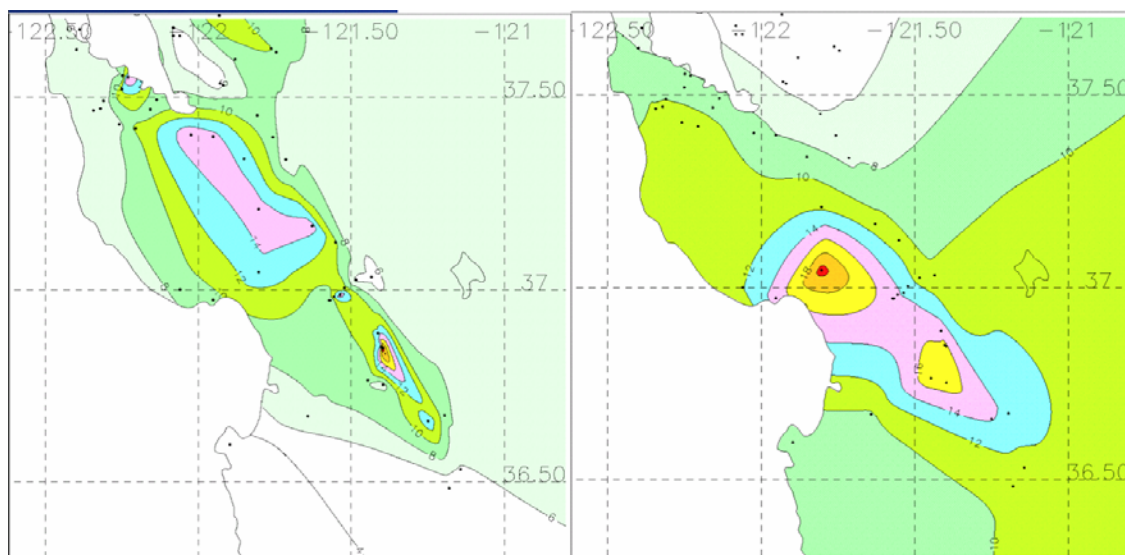
La verifica dell’efficacia dell’algoritmo in modalità inversa è stata effettuata ritrovando la sorgente dei seguenti terremoti: Northridge 1994, Loma Prieta 1989, Irpinia 1980. Nei primi due casi, sono anche stati prodotti gli scenari parametrici di spostamento (rispettivamente con circa 50.000 e 60.000 sorgenti), che sono stati confrontati con gli spostamenti sperimentali forniti da varie agenzie USA; nel terzo caso (Irpinia 1980) si sono per ora invertite (con successo) le intensità dell’evento.

Dal momento che il modellino KF tratta solo onde di corpo, tutte le forme d’onda americane utilizzate sono state preliminarmente controllate eliminando gli spostamenti portati da onde superficiali.

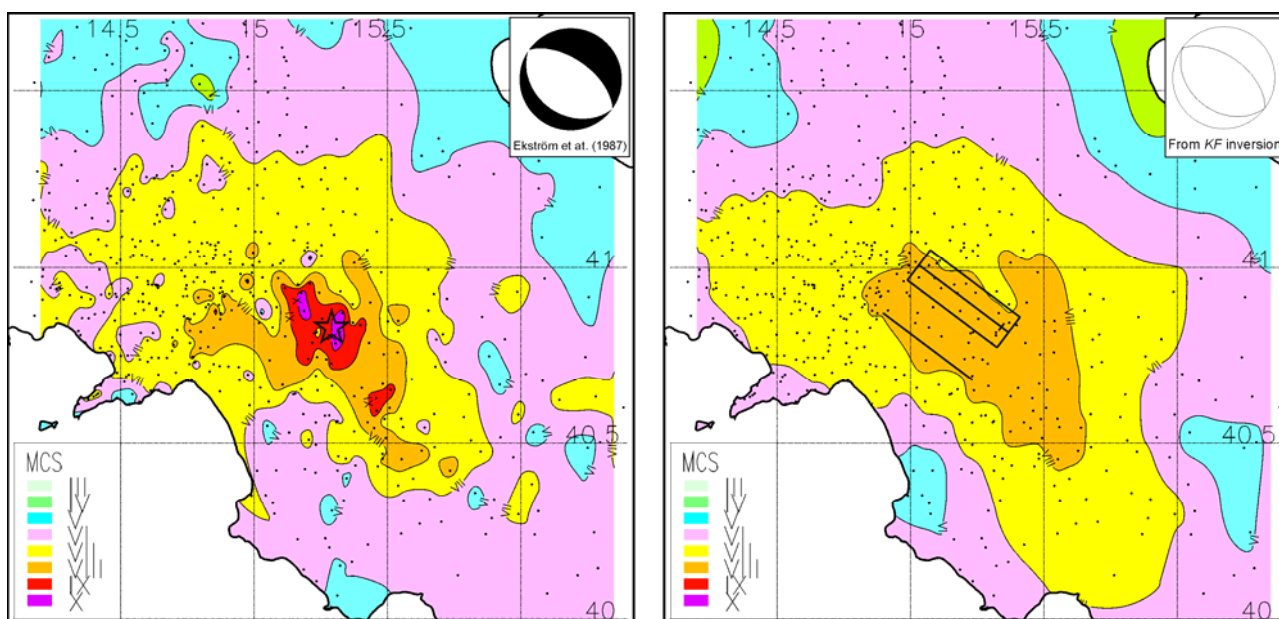
Sulla base dei dati di Northridge, è stata ottenuta la seguente correlazione fra spostamenti orizzontali massimi al suolo (PGD) ed intensità “ I ” stimate dall’USGS (nella scala MMI): $\log \text{PGD} = -1.443 + 0.296 I$ (con $R^2=0.66$; numero dei dati $N=79$, ricavati da accelerogrammi corretti dalle agenzie USC, USGS, DWP, CDMG registrati a breve distanza dai siti cui le intensità si riferiscono).



La figura 1 si riferisce al caso del terremoto di Northridge; quella raffigurata è la Great Los Angeles Region, sulla costa del Pacifico; gli spostamenti sono in cm. A sinistra: spostamenti sperimentali PGD portati da onde body (interpolazione N-N basata sul principio dei vicini naturali; i punti neri sono i siti accelerometrici). A destra: scenario parametrico KF (valori medi – *calcolati su grigliato regolare* – aumentati di una deviazione standard della correlazione I /PGD e di una deviazione standard di scenario).



La figura 2 si riferisce al caso del terremoto di Loma Prieta; quella raffigurata è l'area a sud della Baia di San Francisco, sulla costa del Pacifico; gli spostamenti sono in cm; il confronto è ancora preliminare perché, causa la mancanza di georeferenziazione dei siti accelerometrici USGS non più attivi, i dati sperimentali sono incompleti. A sinistra: spostamenti sperimentali PGD portati da onde body (interpolazione N-N; i punti neri sono i siti georeferenziati). A destra: scenario parametrico KF (valori medi – *calcolati nei siti accelerometrici dell'USG finora georeferenziati* –).



La figura 3 illustra l'ottimo successo ottenuto nell'inversione del terremoto dell'Irpinia del 1980, premessa necessaria (anche se non sufficiente) per confidare nello scenario in spostamento D10, che stiamo per produrre per via parametrica in modalità diretta. Si noti che sono state trattate intensità MCS (dati DBM04 allegati al catalogo CPTI04 di Boschi et al., 2004) con la nostra procedura messa a punto sulle intensità MMI dell'USGS. A sinistra: intensità sperimentali (interpolazione N-N; i punti neri sono i siti esaminati); il meccanismo di Ekström et al. (1987), ottenuto per via strumentale, è simile alle fault-plane solutions ricavate da: Gruppo di Lavoro Irpinia (1981), Gasparini et al. (1982), Boschi et al. (1981), Giardini et al. (1984), Westaway e Jackson (1987), Kanamori e Given (1982), Nakanishi e Kanamori (1984), Giardini (1993). A destra: intensità sintetiche KF del modello a minima varianza trovato *automaticamente* con algoritmo genetico a quattro popolazioni. Gli spicchi del meccanismo focale non sono colorati perché c'è l'ineliminabile ambiguità di 180° nell'angolo di rake. Sono anche rappresentati: la proiezione del piano di

rottura e la sua intersezione virtuale con la superficie topografica (supposta orizzontale). Il segmento-intersezione appare troppo spostato verso SW perché: 1) l'inversione controlla male la profondità; 2) il piano di rottura è stato prolungato verso l'alto senza considerare concavità geologicamente plausibili. Nota bene: essendo il meccanismo di puro dip-slip, il problema di inversione è perfettamente bimodale, ed infatti la seconda popolazione si insedia nel minimo di residui pertinente al piano ausiliario della fault-plane rappresentata in figura (cioè il piano orientato verso SE ed immergente verso il Tirreno [che produce un campo macrosismico sintetico quasi identico a quello mostrato]).

5.3 Bibliografia

- Pettenati F., Sirovich L., Bungum H., and J. Schweitzer (2005). Source inversion of regional intensity patterns of five earthquakes from south-western Norway. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 46, 2-3, 111-134.
- Pettenati F. and Sirovich L. (2005). Intensity-Based Source Inversion of Three Destructive Californian Earthquakes. Submitted to an int. journal.
- Schweitzer J., F. Pettenati, H. Bungum and L. Sirovich (2005). The earthquake of 23 october 1904 in the Oslo Fjord area. Gen. Ass. IASPEI Chile, Oct. 2-8, 2005, abstract and poster.
- Sirovich L. and F. Pettenati (2005). Validation of a new hazard scenario (maximum particle displacements); Northridge, 1994. 1st European Conf. Earthquake Engineering and Seismology. September 3-8, 2006, Geneva, Switzerland.
- Pettenati F. and L. Sirovich (2005). Two validations of a kinematic approach to calculate seismic hazard scenarios. 1st European Conf. Earthquake Engineering and Seismology. September 3-8, 2006, Geneva, Switzerland.
- Pettenati F., P. Galuppo, B. Vladan, L. Sirovich, and M. Bobbio (2005). Comparison test of the most commonly used bivariate interpolation algorithms (to draw isoseismals). 1st European Conf. Earthquake Engineering and Seismology. September 3-8, 2006, Geneva, Switzerland.
- Pettenati F., Sirovich L., M. Bobbio (2005). Tentativo di validazione delle sorgenti e degli scenari di intensità per le zone del Cansiglio e del Montello (Veneto) prodotti dal Progetto Vittorio Veneto. Convegno GNDT dell'INGV Genova, 15-16 febbraio 2005, riassunto.
- Pettenati F., Sirovich L., M. Bobbio (2005). Le sorgenti di tre recenti terremoti distruttivi californiani ritrovate mediante inversione geofisica delle sole intensità macrosismiche.. GNGTS, 15-17 nov. 2005, abstract.
- Sirovich L., Pettenati F., M. Bobbio (2005). Validazione di scenari di intensità (tradizionale, e cinematico KF) per il terremoto di Northridge, California, M_W 6.7, del 1994. GNGTS, 15-17 nov. 2005, abstract.

6 UR 6: POLIMI

6.1 Introduzione

Le attività di ricerca previste per la UR6 sono essenzialmente incluse nel Task 1 “Perfezionamento e integrazioni del modello iniziale di riferimento per lo SRS” e comprendono nel primo anno di attività:

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

6.2 Costruzione della base di dati mondiale

E' stata aggiornata la base di dati accelerometrici digitali rispetto a quella considerata nel modello di riferimento FPR04, aggiungendo le registrazioni di terremoti significativi recenti ($M_w \geq 5.0$), a partire dal 1996 fino al 2005. Tutte le magnitudo sono state ricondotte a M_w , sulla base delle indicazioni dei bollettini sismologici più affidabili. Le registrazioni si riferiscono a differenti condizioni di sito (5% in classe A, 41% B, 36% C, 10% D e 8% prive di informazioni) e coprono un campo di distanze ipocentrali che va da 0 a 150 km. Onde avere classi di magnitudo e distanza omogenee per l'elaborazione delle forme spettrali medie si è proceduto ad una decimazione del database: complessivamente sono state selezionate 1399 registrazioni (Tab. 1), contro le 253 che costituivano la base del modello FPR04; si tratta delle stesse registrazioni usate per ricavare la relazione di attenuazione di D_{10} da UR3, che ne ha incluse 186 aggiuntive.

Tabella 1 – Base mondiale di dati accelerometrici digitali

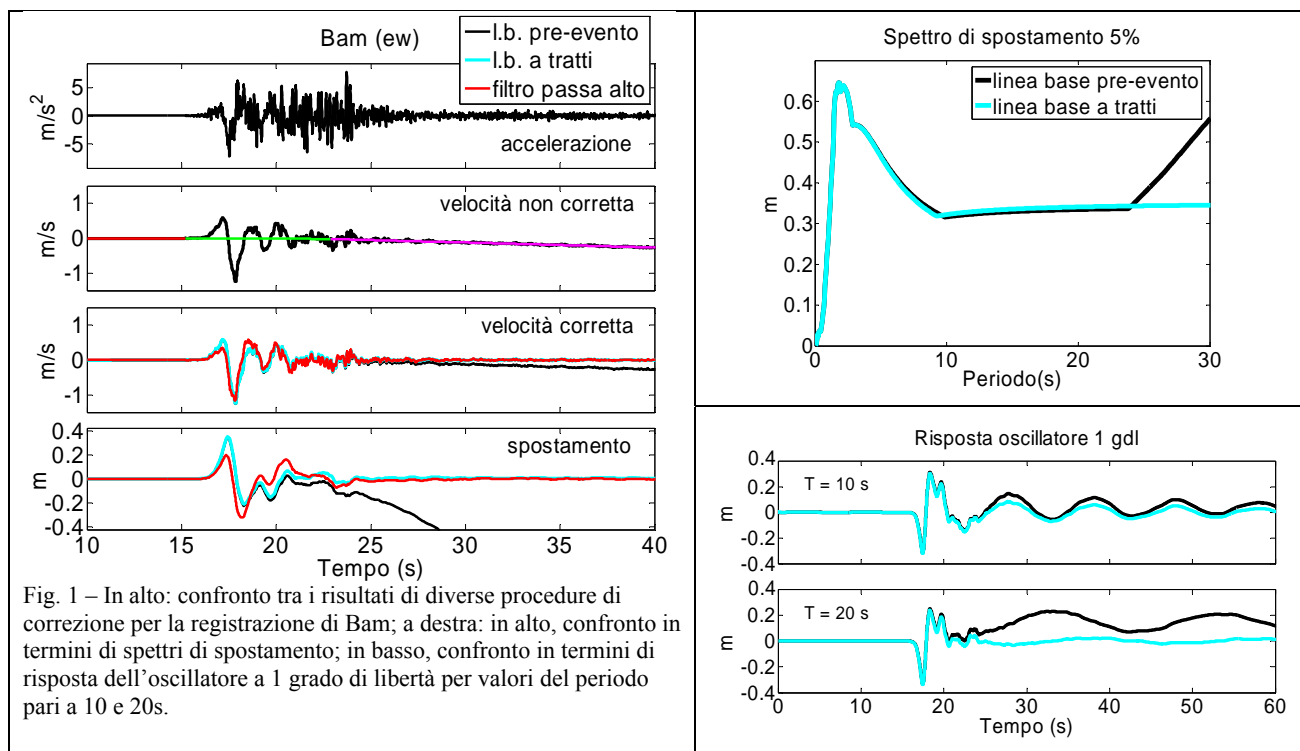
M_w	Regione	Totale	10-30 km	30-50 km	50-75 km	75-100 km	100-125 km	125-150 km
5.0-5.4	Italia	7	336	6	0	1	0	0
	Turchia	15		1	8	2	3	1
	Giappone	282		13	36	42	62	64
	Stati Uniti	32		11	10	7	4	0
5.5-5.9	Italia	4	582	3	0	1	0	0
	Giappone	578		42	88	116	116	109
6.0-6.3	Turchia	1	279	1	0	0	0	0
	Iran	21		2	7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

6.3 Scelta della procedura di correzione ottimale

L'obiettivo di questa fase del lavoro è stato di identificare la eventuale dipendenza delle ordinate degli spettri di spostamento per lunghi periodi (almeno fino a $T=10$ s) dalla particolare procedura di correzione della linea base, al fine di individuare da una parte gli insiemi di dati più affidabili su cui eseguire le analisi statistiche, dall'altra la procedura di correzione più adatta per l'elaborazione di quantità notevoli di dati.

In questo ambito, è stata messa a punto e calibrata una procedura “avanzata” di correzione della linea base degli accelerogrammi, eseguita tramite il programma Matlab basco.m (baseline correction), trasmesso anche alle altre UR del progetto. Questa si basa sulla correzione a tratti della linea base del segnale in velocità, ottenuto per integrazione dall'accelerogramma non corretto. Il programma prevede la definizione di tre intervalli in cui suddividere il segnale velocimetrico, e all'interno di questi opera una regressione lineare ai minimi quadrati. E' così possibile definire su ciascun intervallo del velocigramma il segmento di retta che

interpola i dati e che viene poi sottratto al segnale stesso. Si veda a titolo d'esempio il caso, riportato in Fig. 1, della correzione della componente EW dell'accelerogramma di Bam ($M_w 6.5$, Iran) del 26/12/2003.



Successivamente, ai fini della valutazione di diverse procedure sui valori delle ordinate spettrali di lungo periodo, sono stati confrontati gli spettri ottenuti mediante quattro tipi di correzione:

1. correzione della linea base, calcolata su tutto l'accelerogramma;
2. correzione della linea base, calcolata solo sul pre-evento;
3. correzione della linea base a tratti sulla velocità (secondo la procedura "avanzata" sopra descritta);
4. filtraggio passa alta ($f_c = 0.1$ Hz) dell'accelerogramma (prima corretto con il metodo 2).

Dai segnali accelerometrici così corretti sono stati calcolati i corrispondenti spettri di spostamento, per 200 valori del periodo proprio compresi tra 0 e 10 secondi e per un fattore di smorzamento pari al 5 %.

L'insieme di dati analizzato a questo scopo di confronto è costituito da 53 registrazioni (non corrette), provenienti da regioni geografiche e sismotettoniche differenti (Europa, Medio-Oriente, Stati Uniti, Giappone, Taiwan e Messico). Le registrazioni si riferiscono a differenti condizioni di sito e coprono un campo di distanze epicentrali da 0 a 50 km. Per ciascuna registrazione sono state considerate sia le due componenti orizzontali che quella verticale, per un totale di 159 componenti.

Il criterio di valutazione adottato consiste nel considerare "ottimali" le registrazioni i cui spettri di spostamento non presentano una dipendenza importante dalla procedura di correzione della linea base. Sulla base delle analisi svolte, si è potuto dedurre: (i) che i migliori insiemi di dati risultano 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 sui dati italiani e greci e su quelli messicani. Il risultato ottenuto ci ha consentito di giustificare l'adozione, per tutti i dati "affidabili", di una procedura di correzione "semplice", consistente nella sola correzione della linea base calcolata sul pre-evento (procedura 2), facilmente automatizzabile per il trattamento di moli cospicue di dati accelerometrici.

Per comprendere i motivi della scarsa dipendenza delle ordinate spettrali dalla procedura di correzione, si può fare riferimento alla Fig. 1 (destra), nella quale si nota come, per quanto la storia temporale di spostamento calcolata sia evidentemente affetta da una deriva importante, lo spettro di spostamento del segnale corretto sul solo pre-evento diverge da quello con correzione ottimale soltanto per periodi superiori a circa 25 s, in quanto è a partire soltanto da quel valore che gli effetti "spuri" nella risposta dell'oscillatore vengono a dominare l'effettivo spostamento massimo dell'oscillatore.

6.4 Elaborazione delle forme spettrali medie per tutta la base di dati

Al fine di elaborare gli spettri di risposta medi, rappresentativi di tutto il campione di dati, si è proceduto al seguente trattamento delle base di dati mondiale:

- correzione dei dati accelerometrici con procedura automatizzata: sottrazione linea base calcolata solo su pre-evento ed eliminazione della coda del segnale (ad eccezione delle registrazioni italiane che sono state corrette singolarmente con correzione a tratti della linea base);
- calcolo spettri di spostamento per 200 valori del periodo proprio compresi tra 0 e 10 secondi e per un fattore di smorzamento pari al 5 %;
- calcolo della media geometrica tra le due componenti orizzontali $D_h(T) = SRS_h = [SRS_x \times SRS_y]^{1/2}$;
- calcolo delle forme spettrali medie per ciascuna delle classi di magnitudo e distanza stabilite, assumendo una distribuzione lognormale delle ordinate spettrali del campione, per tutti i valori del periodo.

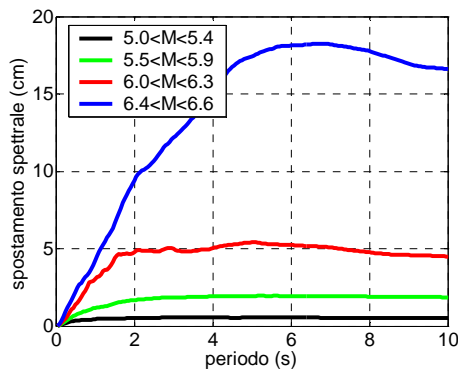


Fig. 2- Forme spettrali mediane per la classe di distanza ipocentrale 10-30 km

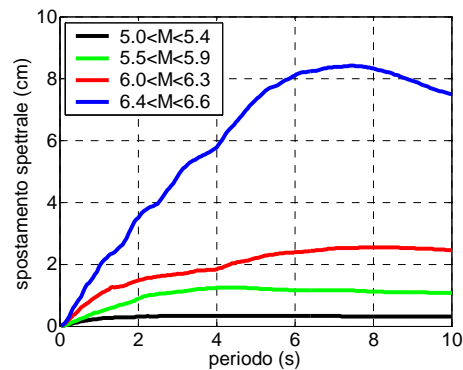


Fig. 3- Forme spettrali mediane per la classe di distanza ipocentrale 30-50 km

Gli spettri mediani per le diverse classi di magnitudo considerate e per le fasce di distanze ipocentrali 10÷30 km e 30÷50 km sono illustrati nelle Figg. 2 e 3. Sulla base di tali risultati, è stata proposta una modifica del modello di riferimento, secondo la seguente forma bilineare:

- per $T_c \leq T \leq T_D$, $S_{De}(T) = a_{max} \cdot 2.5 \cdot (T_c T) / (2\pi)^2$ (1a)
- per $T \geq T_D$, $S_{De}(T) = d_{max} = D_{10}$. (1b)

Tale forma ricalca quella che si ottiene moltiplicando lo spettro elastico di progetto dell'Eurocodice 8 per $(T/2\pi)^2$, avendo considerato $T_c = 0.4s$ (categoria di suolo tipo A). a_{max} e d_{max} sono rispettivamente l'accelerazione e lo spostamento massimo del suolo, quest'ultimo assunto in prima approssimazione uguale all'ordinata spettrale D_{10} per $T = 10s$, almeno nel campo di magnitudo che governano la pericolosità sismica in Italia. A differenza dello spettro di accelerazione di progetto dell'Eurocodice 8 (e delle norme italiane vigenti), il "periodo d'angolo" T_D non risulta fissato a 2s, ma varierà sulla base dell'intesezione tra i due segmenti di retta (1a) e (1b). La stima di a_{max} e D_{10} viene eseguita mediante idonee relazioni di attenuazione, ed in particolare, per quanto riguarda D_{10} , si rimanda alla relazione formulata dalla UR3 in collaborazione con personale di ricerca della UR6. In Fig. 4 è riportato a titolo d'esempio il confronto tra le forme spettrali medie calcolate per la classe di magnitudo 6.4-6.6 ed il corrispondente spettro di riferimento ipotizzato.

Seguendo la procedura indicata per le componenti orizzontali (H), sono state calcolate le forme spettrali medie per la componente verticale del moto (V), procedendo poi all'elaborazione dei rapporti spettrali V/H. Al fine di formulare un modello di riferimento anche per le componenti verticali, si sono confrontati in Fig. 5 i rapporti tra gli spettri mediani delle componenti verticali rispetto a quelli orizzontali, per ciascuna delle classi di magnitudo e per distanza ipocentrale sino a 100 km. Sullo stesso grafico è stato inoltre riportato il corrispondente rapporto tra gli spettri di normativa relativi alle componenti verticale (S_{ve}) ed orizzontale (S_e), avendo considerato $T_D = 1s$ (applicato alla componente verticale secondo la normativa), nonché due ipotesi alternative: $T_D = 2s$ (coincidente con quello definito per S_e) e $T_D = 3s$, che, come mostrato in Fig. 5, consente di ottenere il migliore adattamento con i rapporti V/H osservati, almeno nell'ambito di ipotesi semplici, compatibili con gli spettri elastici di normativa.

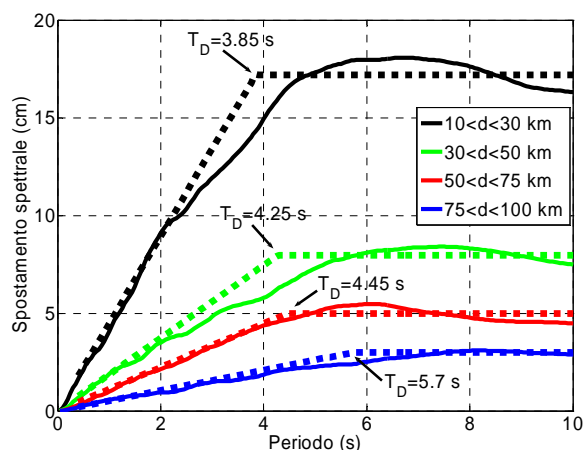


Fig. 4- Ipotesi di modello di riferimento per SRS a confronto con le forme spettrali mediane della classe $6.4 \leq M \leq 6.6$

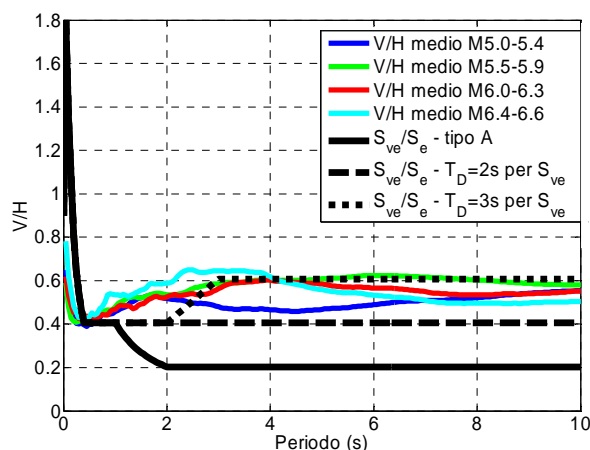


Fig. 5- Rapporti tra gli spettri medi della componente verticale rispetto a quella orizzontale.

6.5 Effetti della categoria di suolo

Lo studio si è infine rivolto alla quantificazione degli effetti della categoria di suolo (o di sito) sulle ordinate spettrali di lungo periodo. A questo scopo, è stata seguita la procedura seguente:

- Selezione dei soli dati delle reti giapponesi KNet o KikNet, in modo da disporre di informazioni omogenee sulle condizioni di sito e facendo tesoro della loro preponderanza nella base di dati mondiale di cui sopra.
- Classificazione delle stazioni per le quali sono disponibili profili stratigrafici di V_s fino ad una profondità $z < 30$ m, formulando in particolare una nuova correlazione $V_{s,30}$ vs. $V_{s,z}$, basata interamente su dati giapponesi provenienti dalla KikNet, ed ottenendo la suddivisione in Tab. 2. Come si nota, il problema principale da affrontare 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.
- Quantificazione degli 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.
- Quantificazione “locale” degli effetti di sito per le sole stazioni della rete KikNet, per le quali risultano disponibili registrazioni sia in superficie che a profondità variabili tra 100 e 200 m, sia mediante studio dei rapporti tra spettri di spostamento dei segnali in superficie rispetto a quelli in profondità (previa deconvoluzione), sia mediante simulazione numerica per quelle classi di magnitudo e distanza scarsamente coperte dai dati disponibili.

Tab. 2. 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

Le principali indicazioni emerse sugli effetti della categoria di suolo risultano le seguenti:

- gli effetti più significativi risultano per basse magnitudo e distanze, probabilmente a causa delle minori lunghezze d'onda in gioco;
- gli effetti per suolo di classe B sono modesti (inferiori a 5% per M6.6, inferiori a 10% per M5-5.4), risultando quindi giustificata l'assimilazione delle classi B e A ai fini di quest'analisi, e delle sue applicazioni;
- gli effetti per classe C sono significativi, apparentemente soprattutto per distanze brevi e magnitudo basse (indicazione confermata sia da KNet che da KikNet), con fattori di amplificazione variabili tra 1.05 e 1.3;
- pur non essendovi dati a sufficienza per la classe D, le analisi compiute sembrano suggerire effetti molto significativi, con fattori di amplificazione variabili tra 1.5 e 2.3 (o anche maggiori) e dipendenti dalla frequenza. Le analisi sui profili KikNet si riferiscono a situazioni intermedie tra C e D e forniscono amplificazioni tra 1.2 e 1.5;
- a parte il caso dei siti di classe D, per il quale sono necessarie analisi più approfondite, la dipendenza del fattore di amplificazione di sito dal periodo è modesta per $T > 2$ s, risultando così giustificata l'introduzione di un fattore di sito indipendente dal periodo;
- I risultati preliminari ottenuti dalla UR3 per la relazione di attenuazione di D_{10} 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.

7 UR 7 : EUCENTRE

7.1 I anno di attività

Le attività previste per il primo anno di attività sono state svolte senza difficoltà particolari, come descritto nel seguito.

7.1.1 Task 2a) Revisioni delle formulazioni attualmente disponibili per il calcolo dei fattori di riduzione dello SRS, e individuazioni dei loro limiti e necessità di sviluppo

In questa fase del progetto, le attuali formulazioni per la riduzione delle ordinate spettrali per coefficienti di smorzamento viscoso equivalente (ξ) differenti dal 5% sono state riesaminate. Si è fatto riferimento, tra gli altri, al lavoro di Bommer e Mendis [2005], nel quale differenti espressioni per il calcolo del fattore di scala η sono state confrontate, evidenziando come quest'ultimo possa variare in modo significativo passando da coefficienti di smorzamento del 5% a valori del 30% (comunemente riscontrati in strutture duttili soggette ad elevate deformazioni in campo plastico). Il divario evidenziato dai risultati riportati in questo studio è certamente dovuto alle diverse caratteristiche delle azioni sismiche considerate nella definizione delle diverse formulazioni proposte. Di conseguenza, è evidente la necessità di un approfondito studio parametrico nel quale un'ampia gamma di azioni sismiche dalle differenti caratteristiche venga presa in esame.

Inoltre, la variabilità dei valori del coefficiente di smorzamento viscoso equivalente (ξ) ottenuti da formulazioni esistenti sono state riesaminate. Un ampio numero di equazioni presenti in letteratura sono state scrutinate, dalla quale emerge chiaramente come significative variazioni possono essere ottenute applicando formulazioni differenti. E' risultato quindi anche evidente la necessità per uno studio parametrico ugualmente approfondito che prenda in esame i valori corretti del coefficiente di smorzamento viscoso equivalente per differenti tipologie strutturali, aventi diversi livelli di rigidità e capacità di spostamento. **[Deliverable D5, 6 mesi, compiuto]**

7.1.2 Task 2b) Analisi dinamiche non lineari su sistemi ad 1 gdl, variando il periodo di vibrazione, le capacità di deformazione e il tipo di risposta

Avendo identificato, nella fase precedentemente descritta, la manifesta necessità per un'ulteriore verifica e sviluppo delle metodologie disponibili per il calcolo dei fattori di riduzione dello SRS, la seconda fase del lavoro ha avuto inizio. Quest'ultima consiste in un'analisi parametrica per mezzo della quale la risposta dinamica di diverse tipologie di sistemi strutturali, caratterizzati da differenti caratteristiche di risposta, è analizzata, con l'intento di definire una relazione tra smorzamento viscoso equivalente e periodo, duttilità e tipologia strutturale.

In conseguenza del gran numero (migliaia) di analisi richieste, modelli ad un solo grado di libertà (1 g.d.l.) sono stati adottati al fine di descrivere la risposta del sistema strutturale reale. Analogamente, sei modelli costitutivi sono stati identificati per la rappresentazione del comportamento non lineare di strutture reali soggette ad azione sismica. Una procedura iterativa è stata adottata per definire le equazioni che identificano il coefficiente di smorzamento viscoso equivalente da utilizzare in corrispondenza di un assegnato livello di duttilità e legame costitutivo adottato. Come primo passo, accelerogrammi spettro-compatibili sono stati adottati, per eliminare la variabilità ottenuta con accelerogrammi reali.

7.1.3 Task 2c) Derivazione dei fattori di riduzione dello SRS, rapportati allo spettro elastico standard (smorzamento 5%), in funzione della duttilità e periodo della struttura

Sulla base dei risultati di cui al punto (b), sono state derivate una serie di equazioni che consentono la quantificazione dello smorzamento equivalente (necessario per la riduzione dello SRS) in funzione della duttilità e periodo della struttura: **[Deliverable D6, 12 mesi, compiuto]**

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

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

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

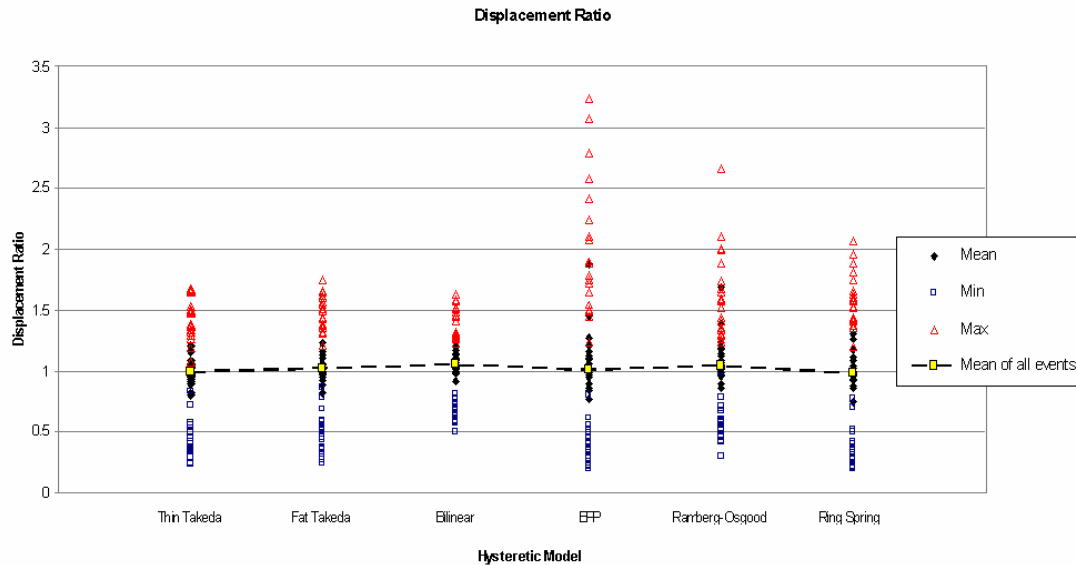
7.2 II° Anno di attività

Dato il progresso positivo dei lavori, alcune delle attività inizialmente assegnate per il secondo anno di attività, descritto di seguito, sono state in realtà iniziato in anticipo, mentre alcuni nuovi task sono stati aggiunti, uno di questi come risultato delle osservazioni dei reviewers

7.2.1 Task 2d e 2e) Verifica delle equazioni per strutture a molti gradi di libertà, incluso edifici con comportamento degradante (rigidezza e resistenza) nella fase post-picco

Poiché le equazioni descritte al punto (c) sono state derivate considerando sistemi semplificati (ad un grado di libertà), è stato necessario verificare se la loro applicazione a strutture realistiche (telai in ca, cioè sistemi a più gradi di libertà) porta a risultati accettabili.

Sono stati considerati sette differenti modelli strutturali di strutture esistenti (edifici a 3, 4, 5, 6 ed 8 piani), che presentano anche problemi di softening (degrado di rigidezza e resistenza). Sono stati eseguiti confronti tra lo spostamento ottenuto da analisi dinamiche non-lineari con quello di un oscillatore ad un grado di libertà sovra-smorzato (equazioni derivate in al punto (c) descritto sopra). I valori medi dei risultati (confronto tra 1GDL e MGD) si è verificato essere vicino all'unità (leggermente superiore, quindi conservativo), per cui si è ritenuto lecito assumere che le equazioni derivate per sistemi ad 1GDL possano essere applicate a strutture MGD, anche quelle che presentano problemi di post-peak softening. *[Nonostante i buoni risultati ottenuti, questa verifica verrà comunque ulteriormente approfondita]*



7.2.2 Task 2f) Verifica delle equazioni proposte per accelerogrammi reali [TASK NUOVO]

Poiché le equazioni sono stati derivati in base a dei risultati ottenuti con accelerogrammi artificiali, diventa necessario verificare la loro validità per accelerogrammi reali. Sono stati utilizzati, complessivamente, 29 accelerogrammi; di questi 14 sono rappresentativi della sismicità in Italia (forniti da Faccioli/Paolucci). La bontà dell'equazioni è valutata tramite il parametro DR (displacement ratio), definito come il rapporto tra lo spostamento ottenuto tramite un'analisi dinamica non-lineare della struttura (valore "esatto") e quello previsto con lo SRS ridotto tramite l'utilizzo delle equazioni proposte (valore approssimato, semplificato). I valori medi del rapporto fra spostamenti (dinamico/spettro) sono risultati essere prossimi all'unità, però, si è osservato un grosso scarto nei risultati, che non è stato ancora possibile giustificare od eliminare. **[questa verifica verrà quindi ulteriormente approfondita]**

7.2.3 Task 2g) Estensione dei risultati ottenuti (che mirano alla definizione di SRS sovra-smorzati) a SRS anelastici [TASK NUOVO]

Con l'obiettivo di 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 dallo Direct Displacement-Based Design (in cui l'input viene definito tramite lo SRS sovra-smorzato).

8 UR8: UniGe

Task 2: Valutazione dell'influenza di diverse forme di dissipazione sullo Spettro di Risposta di Spostamento; definizione di spettri di verifica per costruzioni monumentali

8.1 Premessa

A causa di una intrinseca vulnerabilità tipologica (geometria, grandi dimensioni, fasi costruttive, trasformazioni, etc.) e della limitata resistenza a trazione della muratura, il danno ed il collasso negli edifici monumentali si sviluppano nella forma di meccanismi locali. L'azione dinamica del sisma evidenzia, nelle costruzioni monumentali, "macroelementi" (Doglioni et al., 1994) caratterizzati da un comportamento strutturale in gran parte autonomo rispetto al resto della struttura. In presenza di muratura di buona qualità, il danno in tali macroelementi si manifesta con la perdita di equilibrio di rilevanti porzioni murarie assimilabili a corpi rigidi. Dopo l'attivazione del meccanismo, tali blocchi ruotano e traslano sostenendo spostamenti anche elevati prima del collasso.

Per gli edifici ordinari, la verifica dei meccanismi locali si esegue (ai sensi dell'OPCM 3431/2005 - Allegato 11.C), confrontando la domanda e la capacità in termini di spostamento spettrale. La capacità viene valutata applicando l'analisi cinematica lineare e non lineare per valutare rispettivamente l'accelerazione di attivazione del cinematisimo e la capacità di spostamento ultimo.

L'estensione di questi criteri al caso degli edifici monumentali richiede ancora molti approfondimenti relativamente a: 1) definizione di un SDOF non lineare equivalente e di curve di capacità per le configurazioni cinematiche tipiche dei macroelementi; 2) caratterizzazione del periodo iniziale T_0 per tenere conto di una prima interazione macroelemento-struttura; 3) rappresentazione della domanda sismica.

E' importante osservare che le strutture monumentali sono caratterizzate da grandi capacità di spostamento, periodi iniziali relativamente elevati e periodi secanti che incrementano notevolmente a causa della limitata resistenza a trazione della muratura (non linearità legata alla fessurazione). Questo comporta da un lato, la necessità di una accurata definizione degli spettri nel campo dei lunghi periodi, e dall'altro l'impossibilità di utilizzare gli spettri anelastici, per la riduzione della domanda; le duttilità risultano, infatti, molto elevate e di conseguenza l'approccio degli spettri anelastici (ad esempio secondo Fayfar, 2000) non può essere considerato attendibile, essendo basato sul periodo elastico della struttura.

L'utilizzo di spettri elastici sovrasmorzati, proposto nell'ambito di questa ricerca per rappresentare la domanda ridotta, richiede notevoli approfondimenti, avendo a che fare con edifici monumentali. Le caratteristiche dissipative delle costruzioni monumentali sono, infatti, molto diverse rispetto a quelle di telai in cemento armato o di edifici ordinari in muratura.

Nel primo anno, la ricerca si è concentrata sulla messa a punto di un modello dinamico non lineare capace di descrivere la risposta sismica di un macroelemento rappresentativo di porzioni di edificio monumentale. Utilizzando tale modello, sono state eseguite un gran numero di analisi dinamiche al passo, su SDOF non lineari ed utilizzando diversi accelerogrammi, a supporto della proposta e della calibrazione di metodi normativi semplificati.

8.2 Il modello dinamico

Per descrivere il comportamento dinamico di un sistema SDOF equivalente a un macroelemento è stato utilizzato un modello analogo a quello proposto da Housner (1963), caratterizzato da: 1) comportamento elastico non lineare, con ramo softening, 2) dissipazione dell'energia tenuta in conto, nella forza di richiamo, attraverso il coefficiente di smorzamento viscoso equivalente.

Con riferimento a una configurazione cinematica plausibile per il macroelemento (Fig. 1-a, 1-b), la forza di richiamo $r(\theta)$ è stata descritta attraverso la curva di capacità risultante dall'analisi cinematica non lineare. La curva di capacità per il SDOF equivalente (Fig. 1-c) è stata ottenuta considerando il fattore di partecipazione modale e la massa partecipante, calcolati rispetto al vettore degli spostamenti orizzontali (OPCM 3431/2005 - Allegato 11.C). E' stato, inoltre, introdotto un ramo elastico iniziale, al fine di rappresentare una prima deformabilità globale del sistema macroelemento-struttura.

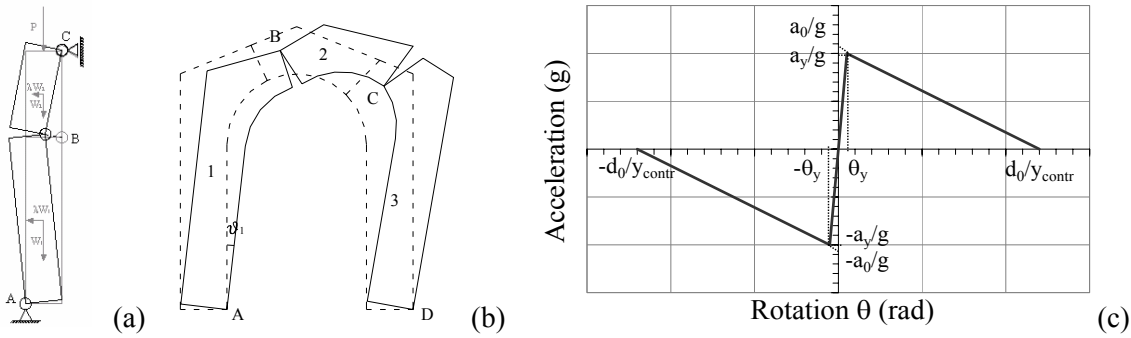


Figura 1: Cinematismi di macroelementi: a) facciata (in presenza di catene); b) arco trionfale; c) curva di capacità bilineare con ramo elastico in termini di accelerazione (in unità di g) e rotazioni θ

La soluzione numerica dell'equazione del moto, per l'oscillatore non lineare e nel caso di vibrazioni forzate smorzate (1), è stata ottenuta implementando un programma numerico in linguaggio Fortran, dove, per l'integrazione numerica, è stato adottato il metodo esplicito proposto da Runge-Kutta.

$$\ddot{\theta} + \gamma \dot{\theta} + p^2 r(\theta) = -p^2 \frac{a_g(t)}{g} \quad (1)$$

con $\theta = \theta(t)$ grado di libertà rotazionale, $\dot{\theta}$ e $\ddot{\theta}$ derivate temporali prima e seconda, γ coefficiente di smorzamento funzione dello smorzamento viscoso equivalente ξ_{eq} , $r(\theta)$ forza di richiamo, $a_g(t)$ l'accelerazione al suolo, g l'accelerazione di gravità.

Dopo aver considerato diverse formulazioni, lo smorzamento viscoso equivalente ξ_{eq} è stato definito in funzione del periodo con: 1) un valore costante $\xi_{eq} = 5\%$ per periodi inferiori ad un valore convenzionale assunto $T \leq T_I$ con $T_I = 0.4$ s, 2) un valore costante $\xi_{eq} = 20\%$ per periodi superiori ad un valore finale $T \geq T_F$, 3) una variazione lineare nel range di periodo $T_I \leq T \leq T_F$. Il valore costante $\xi_{eq} = 5\%$ (per $T \leq T_I$) è stato imposto con la finalità di rendere la fase non lineare per quanto possibile indipendente dal valore del periodo iniziale T_0 , caratterizzato da notevole incertezza. Il limite superiore $\xi_{eq} = 20\%$ (per $T \geq T_F$) è stato introdotto sulla base di evidenze sperimentali (Doherty et al., 2002).

In questa prima fase dell'analisi, sono stati identificati intervalli di valori plausibili per i parametri a_0 , d_0 , T_0 , per definire curve di capacità rappresentative di oscillatori SDOF equivalenti a meccanismi di ribaltamento delle facciate. In particolare, sono state identificate 864 combinazioni per altrettanti SDOF equivalenti, considerando parametricamente i seguenti valori: periodo iniziale T_0 ($0.1 \leq T_0 \leq 0.6$ s), accelerazione di attivazione a_0 ($0.5 \text{ m/s}^2 \leq a_0 \leq 8 \text{ m/s}^2$), spostamento ultimo d_0 ($0.5 \text{ m} \leq d_0 \leq 2.1 \text{ m}$).

8.3 Definizione dell'input sismico

Le analisi dinamiche sono state effettuate con riferimento sia ad accelerogrammi registrati sia ad una base accelerometrica artificiale spettro-compatibile. La base accelerometrica reale è stata fornita dalla UR6-Polimi (Rif.). Gli accelerogrammi artificiali sono stati generati con il programma SIMQKE (Gasparini e Vanmarke, 1976) con riferimento agli spettri di progetti EC8 (CEN 2003), per una accelerazione di $a_g = 0.35$ g, classi di suolo A, B e D e durata $t = 15$ s e $t = 20$ s.

8.4 Definizione preliminare della procedura per la valutazione della risposta

La procedura semplificata proposta per la valutazione della risposta sismica di meccanismi legati a edifici monumentali (o loro macroelementi) utilizza l'approccio cinematico non lineare per la descrizione delle curve di capacità e gli spettri elastici sovrasmorzati per la rappresentazione della domanda del terremoto. La prestazione della struttura, in termini di spostamenti, è ottenuta dal loro confronto.

Per ciascuno degli 864 sistemi SDOF considerati (§ 1), è stato valutato il periodo secante $T_{max} = T(\theta_{max})$ corrispondente alla massima rotazione θ_{max} risultante dalle analisi dinamiche. Lo smorzamento viscoso equivalente $\xi_{eq} = \xi_{eq}(T_{max})$ è stato calcolato secondo la correlazione descritta in § 1. Lo spettro elastico è stato quindi ridotto tramite il fattore proposto dall'EC8 (eq. 3.6 in §3.2.2.2), in funzione di ξ_{eq} . In corrispondenza di T_{max} , sono stati valutati lo spostamento atteso $S_d(T_{max})$ e la corrispondente accelerazione spettrale $S_a(T_{max})$.

sullo spettro sovrasmorzato, secondo la procedura semplificata. Per la validazione del metodo semplificato, 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.

Per ragioni di sinteticità, è stato fatto riferimento ad una particolare modalità di rappresentazione dei risultati (Fig. 2 e Fig. 3), in un formato con doppio asse delle ordinate. In esso sono rappresentati: 1) lo spettro di risposta in spostamento S_d (ridotto con $\xi_{eq}(T)$ definita in §1) ed il periodo T ; 2) lo spettro di risposta in accelerazione S_a (ridotto con $\xi_{eq}(T)$ definita in §1) ed il periodo T ; 3) lo spostamento massimo d_{\max} delle analisi dinamiche ed il periodo T ; 4) l'accelerazione $a(T_{\max})$ corrispondente a d_{\max} ed il periodo T . La procedura semplificata fornisce valori corretti, rispetto alla risposta dinamica, se il punto d_{\max} sta sullo spettro sovrasmorzato in spostamento S_d e, contemporaneamente, $a(T_{\max})$ giace sullo spettro sovrasmorzato in accelerazione S_a .

8.4.1 Risultati e commenti

La prima fase di validazione del metodo ha previsto l'utilizzo di accelerogrammi spettro-compatibili (§ 2). In Fig. 2, sono proposti alcuni risultati confrontati con 3 tipi di spettri: 1) lo spettro elastico EC8 ridotto tramite il fattore di riduzione, funzione dello smorzamento, proposto dall'EC8 (S_d PP EC8, S_a PP EC8); 2) lo spettro di risposta ottenuto (con tecniche di convoluzione nel dominio del tempo) sulla base della massima risposta di sistemi SDOF lineari con smorzamento del 5% di sistemi SDOF e ridotto con il fattore dell'EC8 (S_d PP, S_a PP); 3) lo spettro ottenuto sulla base della massima risposta di sistemi SDOF lineari, con fattore di smorzamento calcolato con la relazione in § 1 (S_d overdamped, S_a overdamped).

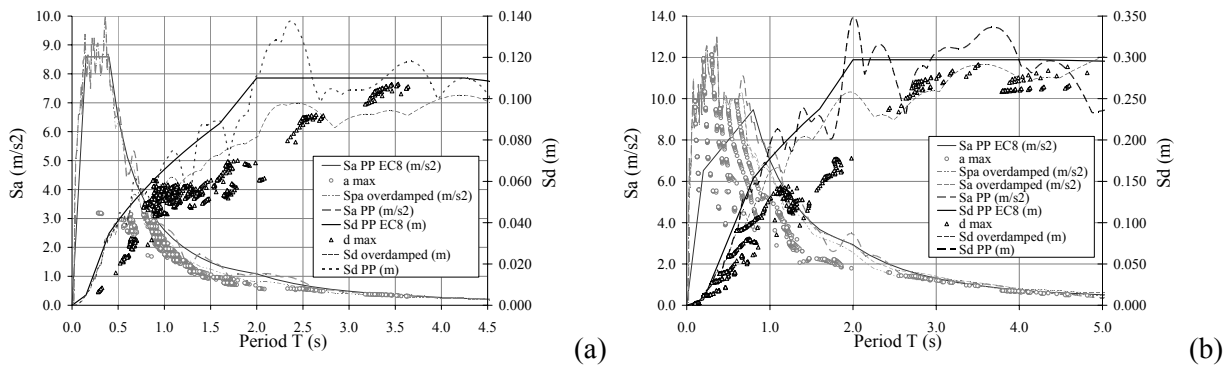


Figura 2: Confronto tra analisi dinamiche e procedura semplificata, smorzamento Tipo3: (a) suolo A; (b) suolo D.

La risposta dinamica è affetta da dispersione solo nell'intervallo dei bassi periodi, meno interessanti per lo studio. Se si considerano gli spettri reali dell'accelerogramma (S_d overdamped, S_a overdamped), la previsione del metodo semplificato nel medio-lungo periodo è in perfetto accordo con i risultati dinamici.

La validazione rispetto ad accelerogrammi reali è presentata in Fig. 3 per gli eventi EQ1 e EQ12.

Si nota come, per uno spettro in spostamenti caratterizzato da alti contenuti energetici in un intervallo di periodi vicino a T_{\max} , la risposta col metodo semplificato sovrastima il valore dell'analisi dinamica. Questo perché nel metodo semplificato la risposta dipende solo da $\xi_{eq}(T_{\max})$, mentre dinamicamente il comportamento non-lineare investe un intervallo più ampio di frequenze.

Si rileva peraltro anche la tendenza opposta, nei casi in cui lo spettro in concomitanza di T_{\max} sia più basso rispetto ai valori immediatamente inferiori del periodo.

Ad oggi non è stato possibile correlare questo fatto con grandezze significative dell'input (intensità di Arias, magnitudo, ecc.). Se lo spettro non mostra picchi o gole significative, come in EQ 12 - Turkey-Duzce1, il metodo semplificato fornisce buoni risultati.

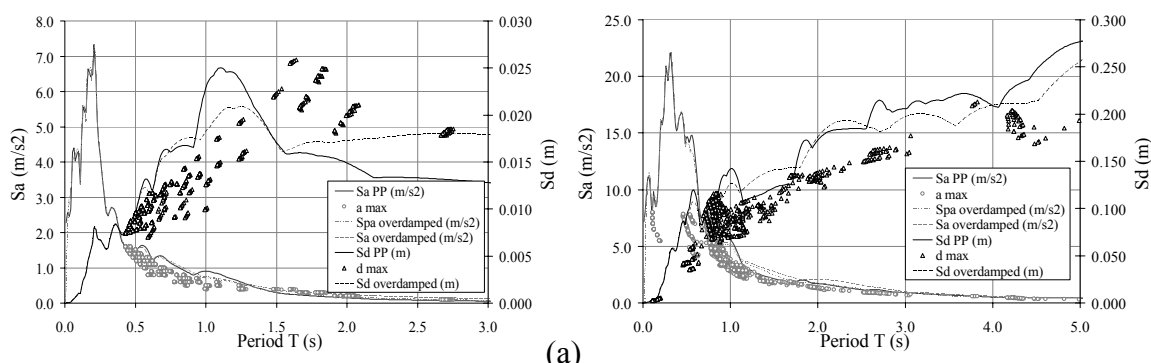


Figura 3: Confronto tra analisi dinamiche e procedura semplificata: (a) EQ 1 - Umbria-Marche –Colfiorito Casermette ; (b) EQ 12 - Turkey-Duzce1.

8.4.2 Considerazioni sui fattori di riduzione dello spettro

Si è notato come, per la maggioranza degli eventi sismici considerati, le ordinate spettrali ridotte tramite fattori di riduzione (Bommer e Mendis 2005) sovrastimino, per alti periodi, quelle valutate con tecniche di convoluzione nel dominio del tempo, sulla base della massima risposta di sistemi SDOF. Ciò è enfatizzato per valori elevati di smorzamento viscoso equivalente. Nella ricerca si è utilizzato il fattore di riduzione dell'EC8 (CEN 2003); una proposta per un fattore di riduzione più adeguato per lunghi periodi è auspicato nel corso del progetto.

8.5 Attività previste nel breve periodo

Nel breve periodo si prevede di approfondire ulteriormente lo studio utilizzando una base accelerometrica più estesa (accelerogrammi forniti da UR6-Polimi) con la finalità di verificare la buona rispondenza del metodo. Per superare le discrepanze nella stima dello spostamento, sarà studiata l'introduzione nel metodo semplificato di un termine o di una procedura che tenga conto del contenuto armonico dello spettro nell'intervallo di periodi vicini a T_{max} .

Saranno avviati, approfondimenti sulla definizione di altre configurazioni caratteristiche degli edifici monumentali (catene cinematiche - per es. archi trionfali di chiese - o comportamento con vincolo monolatero - per es. facciate libere di ribaltare solo da un lato) per la definizione dei sistemi SDOF equivalenti.

8.6 Riferimenti Bibliografici

- CEN (2003). EC8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. European Committee For Standardization, Brussels.
- Dogliani, F., Moretti, A. & Petrini, V. (1994). *Le chiese e il terremoto*. Trieste: Edizioni LINT (in Italian).
- Doherty, K.T., Griffith, M.C., Lam, N., Wilson, J. (2002). Displacement-based seismic analysis for out-of-plane bending of unreinforced masonry walls. *Earth. Eng. and Struct. Dyn.* 2002;31(4). pp. 833–50.
- Fajfar, P. (2000). A nonlinear analysis method for performance-based seismic design. *Earth. Spectra*. 16(3): 573–592.
- Gasparini, D. and Vanmarke E. H. (1976), *Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra*, M.I.T., Department of Civil Engineering Research Report R76-4, Order No. 527.
- Housner, G.W. (1963). The behaviour of inverted pendulum structures during earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 17, pp.40-417.
- OPCM, no. 3431, 3 May 2005. Official Bulletin no. 107, 10 May 2005 (in Italian).
- Bommer, JJ., Mendis R. (2005). Scaling of spectral displacement ordinates with damping ratios. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34:145–165.

