

Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2012 - IARG 2012  
Padova, 2-4 luglio 2012

## PARAMETRI DI INTENSITÀ SISMICA PER LA STIMA DEGLI SPOSTAMENTI PERMANENTI DI PENDII OMOGENEI

Giuseppe Tropeano, Francesco Silvestri  
DIGA, Università di Napoli Federico II

[giuseppe.tropeano@unina.it](mailto:giuseppe.tropeano@unina.it), [francesco.silvestri@unina.it](mailto:francesco.silvestri@unina.it)

Davide Gazzaneo, Ernesto Ausilio  
DDS, Università della Calabria

[ing.gazzaneo@gmail.it](mailto:ing.gazzaneo@gmail.it), [ausilio@dds.unical.it](mailto:ausilio@dds.unical.it)

### Sommario

Gli attuali criteri di progettazione in condizioni sismiche si avvalgono di procedure legate alla valutazione della prestazione del sistema espressa in termini di perdite quantificabili (costi di riparazione), di funzionalità o di beni inestimabili (vite umane, beni storico-culturali). In tale ottica il parametro rappresentativo della risposta è correlato attraverso procedure più o meno sofisticate a uno o più parametri che descrivano le caratteristiche del moto sismico. La scelta di tali parametri deve essere effettuata attraverso criteri di *efficienza* e *sufficienza* (cfr. p.es. [Tothong & Luco, 2007](#); [Luco & Cornell, 2007](#)) inoltre devono poter essere *prevedibili* attraverso opportune leggi di ricorrenza.

In tale ambito, la presente nota propone una applicazione dei criteri citati per la stima della curva di pericolosità degli spostamenti cosismici dei pendii e per la valutazione critica dell'efficienza dei parametri di intensità del moto considerati significativi. In particolare vengono confrontate alcune relazioni indicate nella letteratura nazionale ed internazionale, e viene presentata una relazione che tiene conto dell'intensità di Housner,  $I_H$ , quale parametro efficace per la stima degli spostamenti. Per la previsione del parametro  $I_H$  viene proposta, inoltre, una legge di attenuazione in funzione di magnitudo e distanza.

### Generalità sulle procedure *performance-based*

L'approccio *performance-based* (PBD) nasce dalla necessità di definire un criterio di progettazione più razionale e consistente rispetto ai metodi classici. Il concetto fondamentale delle procedure PBD è la previsione affidabilistica del comportamento del sistema di interesse durante e dopo l'applicazione l'eccitazione sismica.

In generale, seguendo lo schema di fig. 1, un terremoto genera un moto sismico (fase 1) caratterizzato da uno o più "parametri di intensità", **IM**, che induce la risposta dinamica del sistema in analisi (fase 2). Tale risposta, sintetizzata dai parametri di richiesta sismica, **EDP**, comporta una serie di possibili parametri indicatori del danno, **DM** (fase 3), e di conseguenza il raggiungimento di determinate "perdite" del sistema, **DV** (fase 4).

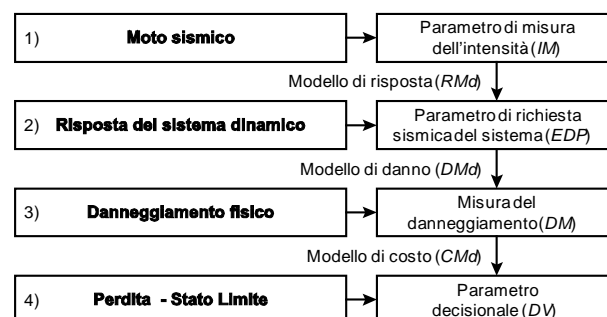


Figura 1. Schema logico della procedura per valutare le "perdite" del sistema dinamico (da [Kramer, 2009](#))

I parametri che caratterizzano ciascuna fase dell'analisi devono essere scelti in modo tale da essere direttamente correlati ai parametri della fase successiva, in base a due proprietà principali (Shome et al., 1998, Baker & Cornell, 2005, Vamvatsikos & Cornell, 2005, Tothong & Luco, 2007, Luco & Cornell, 2007); indicato con  $\mathbf{X}$  il vettore dei parametri considerati rappresentativi di una generica fase e con  $\mathbf{Y}$  quello dei parametri della fase successiva, si definiscono:

- “efficienti” i parametri  $\mathbf{X}$  che inducono una limitata incertezza sulla stima di  $\mathbf{Y}$ ;
- “sufficienti” l'insieme dei parametri  $\mathbf{X}$  che inducono un'incertezza sull'insieme  $\mathbf{Y}$  che non può essere migliorata con l'introduzione di parametri aggiuntivi in  $\mathbf{X}$ .

I parametri del moto,  $\mathbf{IM}$ , inoltre, devono essere definiti mediante un'opportuna legge di ricorrenza statistica, ovvero devono poter essere stimati ad esempio in funzione dei parametri di sorgente e della distanza attraverso opportune relazioni (leggi di attenuazione).

L'affidabilità della previsione delle variabili  $\mathbf{EDP}$ ,  $\mathbf{DM}$  e  $\mathbf{DV}$  è condizionata dall'accuratezza dei modelli che legano tra di loro le variabili (RMd, DMd e CMd in fig. 1).

Sia le variabili sia i modelli sono soggetti ad incertezze, pertanto la curva di pericolosità,  $\lambda(\mathbf{DV})$ , associata agli stati limite  $\mathbf{DV}$ , è espressa in forma vettoriale attraverso l'equazione “sintetica”:

$$\lambda(\mathbf{DV}) = \iiint G(\mathbf{DV}|\mathbf{DM}) |dG(\mathbf{DM}|\mathbf{EDP})| \times |dG(\mathbf{EDP}|\mathbf{IM})| d\lambda(\mathbf{IM}) \quad (1)$$

in cui i parametri sono considerati come variabili aleatorie continue.  $\lambda(\mathbf{X})$  è la funzione di probabilità cumulata (CDF) del generico vettore di parametri  $\mathbf{X}$  delle diverse fasi dell'analisi. Analogamente,  $G(\mathbf{Y}|\mathbf{X})$  è la probabilità cumulata condizionata (CCDF) dei parametri  $\mathbf{Y}$  dato il vettore  $\mathbf{X}$  il cui legame è espresso dai modelli RMd, DMd e CMd.

Per poter affrontare la progettazione di un generico sistema mediante un approccio PBD è necessario, quindi, definire i parametri e le loro mutue correlazioni in termini statistici.

Nel caso di analisi di sistemi naturali, come terreni liquefacibili o pendii naturali, l'approccio PBD deve essere finalizzato alla verifica di stabilità del sito. In particolare, le fasi riguardanti la previsione del danno e delle “perdite” devono essere più propriamente associate alle tipologie strutturali e/o infrastrutturali presenti o in progettazione sul sito. Ne consegue, necessariamente, che un approccio generale al problema non può che limitarsi alla definizione della curva di pericolosità dei parametri di risposta,  $\mathbf{EDP}$ , scelti come significativi, ovvero alla soluzione dell'integrale (2):

$$\lambda(\mathbf{EDP}) = \int G(\mathbf{EDP}|\mathbf{IM}) |d\lambda(\mathbf{IM})| \quad (2)$$

### Applicazione della procedura PBD alla verifica sismica dei pendii

La stabilità dei pendii in condizioni sismiche, di base, prevede come un unico parametro di performance lo spostamento cosismico permanente ( $\mathbf{EDP} = u$ ). Per la definizione del modello di risposta i metodi semplificati, derivati dal modello di blocco rigido di Newmark (1965) e da successive modifiche, risultano particolarmente efficaci, poiché consentono di valutare la distribuzione statistica degli spostamenti dati i parametri  $\mathbf{IM}$  ovvero permettono la definizione della CCDF  $G(\mathbf{EDP}|\mathbf{IM})$  dell'integrale (2).

Secondo una rappresentazione che è ormai divenuta una prassi consolidata, i valori dello spostamento calcolati con il metodo di Newmark, per una serie di registrazioni accelerometriche opportunamente selezionate, sono espressi in funzione del rapporto,  $\eta$ , tra l'accelerazione critica del pendio,  $a_y$ , e una misura dell'accelerazione massima,  $a_{\max}$  (tipicamente l'accelerazione di picco dell'accelerogramma o nel verso di scorrimento del pendio) quale unico parametro  $\mathbf{IM}$ . Tale ultima assunzione non soddisfa pienamente i requisiti di “efficienza” e “sufficienza” richiesti dal metodo; pertanto, diversi Autori hanno proposto leggi di regressione che includono altri parametri del moto la cui scelta è giustificata da:

1. soluzioni analitiche del metodo di Newmark per segnali armonici (p.es. Yegian et al, 1991; Ausilio et al., 2007; Tropeano et al., 2009);
2. procedure di minimizzazione dell'errore nello spostamento previsto (p.es. Bray & Travarasrou, 2007; Saygili & Rathje, 2008).

In questo studio si propone una legge di regressione degli spostamenti cosismici (indicata con la sigla TS) che tiene conto dell'accelerazione massima,  $a_{max}$ , e dell'intensità di Housner,  $I_H$ , definita come:

$$I_H \doteq \int_{T_1}^{T_2} S_v(\tau) d\tau \quad (3)$$

in cui  $S_v$  è lo spettro di pseudo-velocità,  $T_1$  e  $T_2$  sono i periodi estremi dell'intervallo di integrazione considerato (pari a 0.1 - 2.5 s nella definizione standard). Tale parametro è stato scelto poiché si dimostra un buon indicatore dell'intensità macrosismica e, in particolare, del danneggiamento strutturale (Vona et al., 2009; Mucciarelli et al., 2007).

La relazione è stata ottenuta a partire dagli spostamenti calcolati con il metodo di Newmark per il database di accelerazioni italiane considerato da Tropeano et al. (2009) ed è espressa nella forma (Gazzaneo, 2009):

$$\log(u/I_H) = -1.394 - 1.134 \cdot \log(\eta) + 2.509 \cdot \log(1 - \eta) + \sigma_{UH} \varepsilon_{UH, st} \quad (4)$$

$$\sigma_{UH} = 0.241 \cdot \eta + 0.207$$

dove  $u$  è lo spostamento espresso in unità compatibili a quelle di  $I_H$  (tipicamente in cm),  $\sigma_{UH}$  è la deviazione standard della variabile aleatoria (v.a.) residua e  $\varepsilon_{UH, st}$  è l'errore residuo distribuito con legge normale standard.

### Efficienza delle leggi di previsione degli spostamenti

Un criterio per valutare l'efficienza delle correlazioni è la misura della dispersione statistica dei valori residui espressa come deviazione standard. Nella fig. 2 si riporta il confronto tra i valori della deviazione standard della relazione proposta (TS, eq. (4)) con quella della relazioni indicate come R1, R2 e R3 di Saygili & Rathje (2008); M1, M2, M3, M4 e M5 di Madiai (2009) e T1, T2 di Tropeano et al. (2009).

Per le relazioni R2, R3, T2, e TS la deviazione standard è espressa con una legge lineare crescente del rapporto  $\eta$ ; pertanto nella fig. 2 si è evidenziato l'intervallo di variazione del parametro e il suo valore medio.

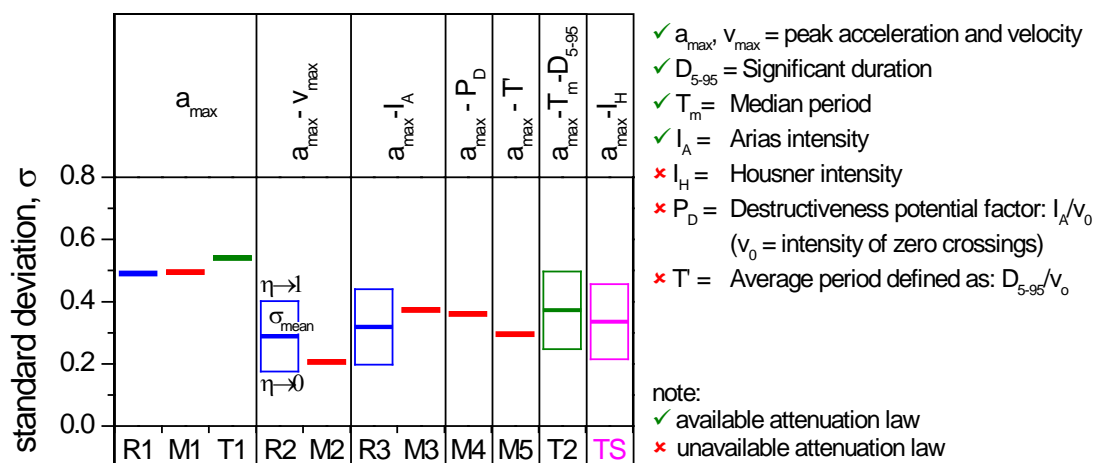


Figura 2. Confronto tra la deviazione standard delle relazioni proposte da Saygili & Rathje (2008) (R), Madiai (2009) (M), Tropeano et al. (2009) (T) e quella proposta in questo studio (TS) per diverse combinazioni dei parametri del moto sismico.

Dalla fig. 2 si può dedurre che i parametri con i requisiti migliori per la stima dello spostamento siano la coppia  $a_{\max}-v_{\max}$ . La differenza tra il valore di deviazione standard delle relazioni R2 e M2 lascia, tuttavia, presupporre che vi sia una notevole influenza del set di accelerogrammi utilizzato per la definizione delle rispettive leggi, e delle correzioni effettuate sui segnali. Tale effetto si riduce in maniera evidente se si confrontano le relazioni che tengono conto dell'intensità di Arias,  $I_A$  ( $I_A = \pi/2g \int a^2(t) dt$ ). Il confronto in termini di  $\sigma$ , pertanto, potrebbe non essere sufficiente a garantire l'effettiva validità della legge di regressione al di fuori del contesto del *database* utilizzato per la sua definizione.

Per accertare l'efficienza della scelta dei parametri **IM**, sarebbe più opportuno verificare la previsione degli spostamenti per frane in cui siano stati osservati scorrimenti cosismici o, in alternativa, per gli spostamenti calcolati a partire da un set di accelerazioni diverso da quello utilizzato per calcolare i coefficienti della legge di regressione.

A titolo di esempio, le previsioni ottenute considerando le leggi esaminate, sono state confrontate con gli spostamenti calcolati per le registrazioni accelerometriche del *main-shock* della sequenza sismica aquilana acquisite sia su terreno sia su roccia entro 100 km dall'epicentro. I risultati espressi in termini di valori medi della v.a. residua,  $\varepsilon$ , sono mostrati nella fig. 3 e confrontati con il range di variazione compreso tra il 16° e l'84° percentile previsto dalle leggi di regressione al variare del rapporto  $\eta$ . Ne risulta che le relazioni indicate come M1, M3 e M4 tendono a sottostimare il valore dello spostamento medio e principalmente per i valori di  $\eta$  più bassi. Di contro le relazioni T1, R1 e T2 sono più cautelative, pur mantenendo la stima entro l'intervallo di confidenza considerato. Le relazioni M2 e M5 mantengono una buona previsione per valori di  $\eta < 0.3$ . Infine, per le registrazioni dell'evento considerato, risultano più affidabili le relazioni R3 e quella proposta in questo studio (TS).

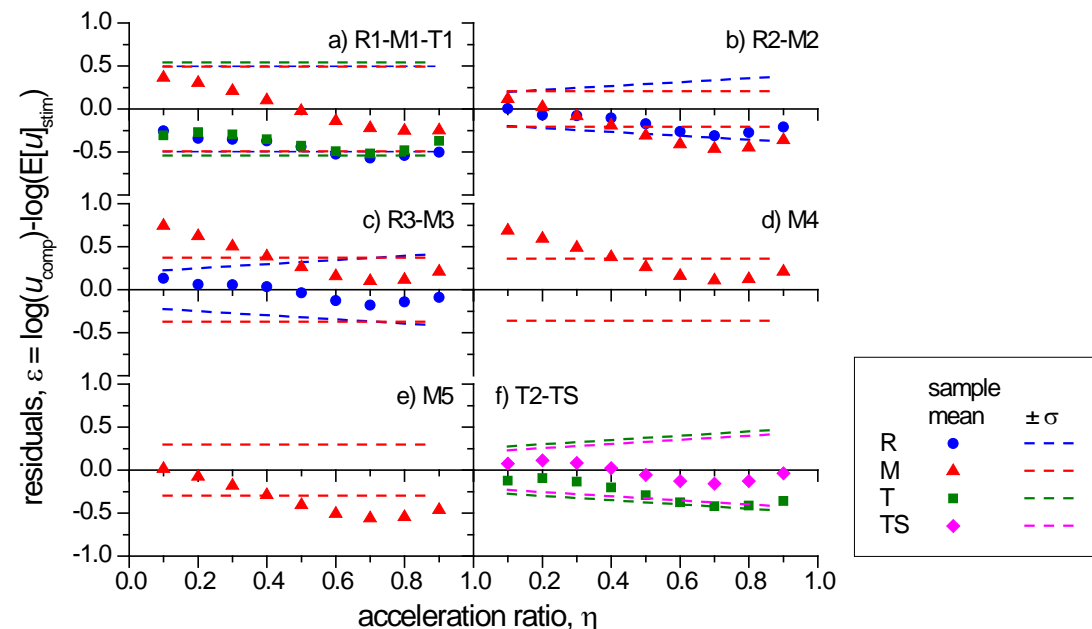


Figura 3. Confronto tra la media dei valori residui degli spostamenti calcolati per le registrazioni del main shock del terremoto aquilano ( $M_w=6.3$ ) e quelli previsti dalle leggi di regressione degli spostamenti di Saygili & Rathje (2008) (R), Madiati (2009) (M), Tropeano et al. (2009) (T) e quella proposta in questo studio (TS) al variare del rapporto  $\eta$ .

### Legge di attenuazione dell'intensità di Housner

Nel precedente paragrafo è stato definito un modello di risposta e la funzione CCDF  $G(\text{EDP}|\mathbf{IM})$ . Per poter calcolare la curva di pericolosità  $\lambda(u)$  è necessario, pertanto, mettere a punto la legge di ricorrenza dei parametri del moto,  $\lambda(\mathbf{IM})$  espressa come legge di attenuazione in funzione della magnitudo e della distanza sito-sorgente.

In generale, per poter definire in maniera consistente una legge di attenuazione è necessario individuare una relazione funzionale tra il parametro di intensità di interesse e i parametri che caratterizzano la sorgente sismica e gli effetti della propagazione. Con riferimento, quindi, alla legge degli spostamenti proposta in questo studio (eq. (4)), tale relazione è stata valutata per l'intensità di Housner a partire dai valori teorici. Questi ultimi sono stati calcolati da una generica legge di attenuazione dello spettro di pseudo-accelerazione,  $S_a$ , per il moto di riferimento (ovvero senza considerare gli effetti di sito) nella forma più semplice:

$$\log S_a(T) = c_0(T) + c_1(T) \cdot f_1(M) + c_2(T) \cdot f_2(R) + \varepsilon_\sigma(T) \quad (5)$$

dove  $c_0(T)$ ,  $c_1(T)$  e  $c_2(T)$  sono coefficienti che dipendono dal periodo  $T$ ;  $f_1(M)$  e  $f_2(R)$  sono due generiche funzioni della magnitudo,  $M$ , e della distanza sito-sorgente,  $R$ , rispettivamente.  $\varepsilon_\sigma(T)$  è la v.a. residua, con media nulla e deviazione standard,  $\sigma$ , funzione del periodo.

Lo spettro di pseudo-velocità può essere derivato dalla relazione (5) nella forma:

$$S_v(T) = 10^{[c_0(T)+c_1(T) \cdot f_1(M)+c_2(T) \cdot f_2(R)]} \cdot \frac{T}{2\pi} \cdot 10^{\varepsilon_\sigma(T)} \quad (6)$$

Ipotizzando che  $c_0(T)$ ,  $c_1(T)$  e  $c_3(T)$  siano funzioni continue, il valore dell'intensità di Housner,  $I_H$ , può essere calcolato analiticamente a partire dalla sua definizione, integrando l'eq. (6) nell'intervallo di periodi  $T_1 - T_2$ :

$$I_H = \int_{T_1}^{T_2} 10^{[c_0(\tau)+c_1(\tau) \cdot f_1(M)+c_2(\tau) \cdot f_2(R)]} \cdot \frac{\tau}{2\pi} \cdot 10^{\varepsilon_\sigma(\tau)} d\tau \quad (7)$$

Al fine di esplicitare la relazione funzionale tra  $I_H$ , la magnitudo e la distanza, sono stati preliminarmente valutati i coefficienti che compaiono nella relazione (5) a partire dagli spettri di pseudo-accelerazione calcolati per un set di registrazioni accelerometriche acquisiti su affioramento rigido (classe A).

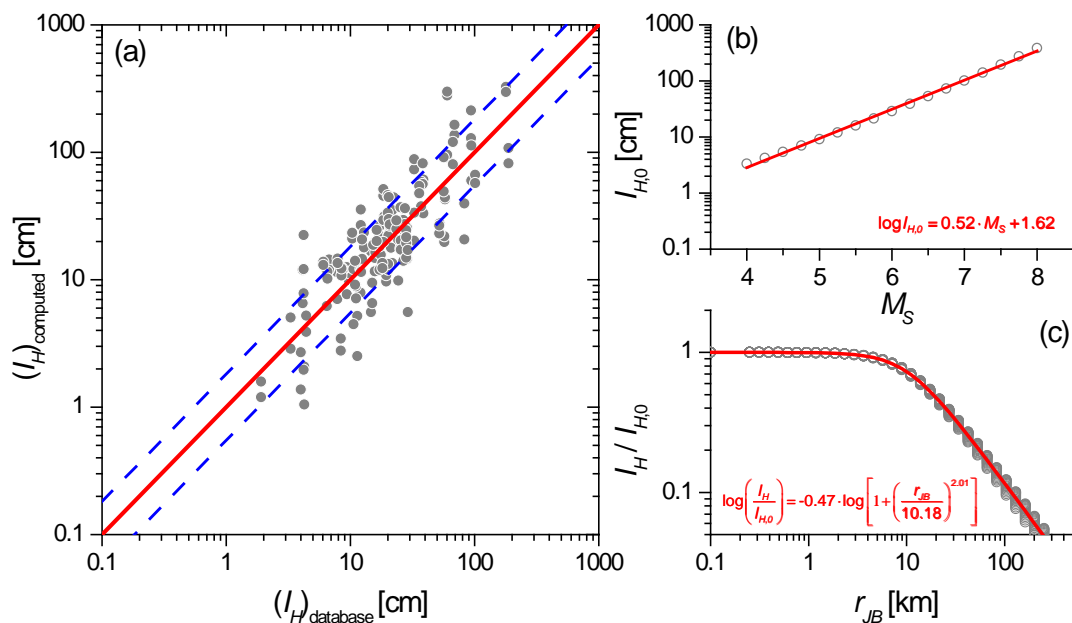


Figura 4. a) Confronto tra i valori campionari dell'intensità di Housner,  $I_H$ , e quelli stimanti con l'eq. (7). Legge di variazione dei dati ottenuti con l'eq. (7) in funzione della magnitudo delle onde di superficie (b) e della distanza di Joyner & Boore (c).

Il *database* considerato in questo studio è composto da registrazioni di eventi italiani con  $M_w = 4 \div 6.9$  al quale sono state aggiunte le registrazioni di eventi internazionali con magnitudo maggiore di 6.5. I coefficienti dell'eq. (5) sono stati valutati considerando la magnitudo delle onde di superficie,  $M_s$ , e la distanza di Joyner & Boore,  $r_{JB}$ . I valori teorici di  $I_H$ , valutati nell'intervallo di periodi 0.1-2.5 s sono stati calcolati analiticamente con l'eq. (7) e confrontati con i valori campionari del *database* di partenza (fig. 4a). Sebbene i risultati mostrino una elevata variabilità dovuta all'accumulo dell'errore nello sviluppo dell'integrale, la dipendenza dei valori teorici di  $I_H$  con la magnitudo può essere descritta attraverso una funzione lineare, in scala semilogaritmica, come mostrato p.es. in fig. 4b per  $r_{JB} = 0.1$  km,  $I_{H,0}$ . L'attenuazione con la distanza è stata rappresentata a partire dai valori di  $I_H$  normalizzati rispetto a  $I_{H,0}$  (fig. 4b) con una funzione logistica modificata.

La legge di attenuazione proposta per il parametro,  $I_H$ , è espressa, quindi, nella forma generale, dalla relazione:

$$\log I_H = a + b \cdot M + c \cdot \log \left[ 1 + \left( R/R_0 \right)^p \right] + \sigma_I \varepsilon_{I,st} \quad (8)$$

Definita la dipendenza teorica tra  $I_H$ ,  $M$  e  $R$ , i coefficienti  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $p$  sono stati ricalcolati a partire dai valori campionari di  $I_H$  con il fine di migliorarne la previsione. Sono state considerate, inoltre, due diverse definizioni della magnitudo del sisma (magnitudo momento,  $M_w$ , e delle onde di superficie,  $M_s$ ) e della distanza sito sorgente (distanza epicentrale,  $r_{epi}$ , e di Joyner & Boore,  $r_{JB}$ ). La distanza di riferimento,  $R_0$ , è stata posta pari a 10 km, avendo verificato la scarsa variabilità del parametro.

I coefficienti della relazione (8), la deviazione standard,  $\sigma_I$ , e il coefficiente di regressione multipla sono riportati nella tabella 1.

Tabella 1. Coefficienti di regressione della legge di attenuazione di  $I_H$  in funzione di:  $M_w - r_{JB}$  (indicato come WJB),  $M_w - r_{epi}$  (WEpi);  $M_s - r_{JB}$  (SJB) e  $M_s - r_{epi}$  (SEpi).

ID	Coefficienti eq. (8)					Deviazione standard $\sigma_I$	Coeff. di regr. $r^2$
	$a$	$b$	$c$	$R_0$ [km]	$p$		
WJB:	-1.976	0.599	-1.010	10	0.992	0.260	0.668
WEpi:	-2.298	0.650	-0.541		1.779	0.275	0.629
SJB:	-0.995	0.515	-2.494		0.431	0.241	0.714
SEpi:	-1.260	0.526	-1.464		0.681	0.271	0.638

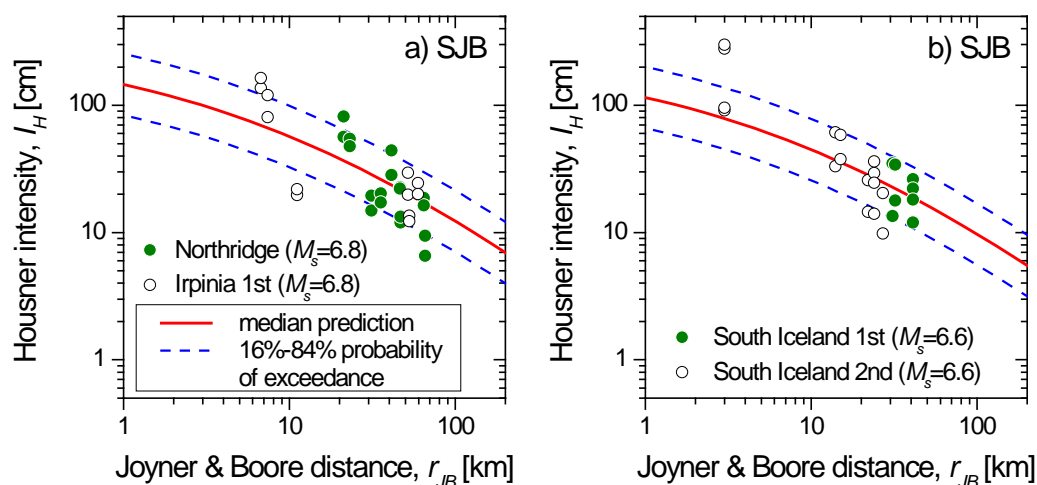


Figura 5. Confronto tra i valori stimati di  $I_H$  e quelli calcolati per le registrazioni di (a) terremoto di Northridge (1971) e irpino-lucano (1980) ( $M_s = 6.8$ ), e (b) eventi principali della sequenza sismica di South Iceland (2000) ( $M_s = 6.6$ )

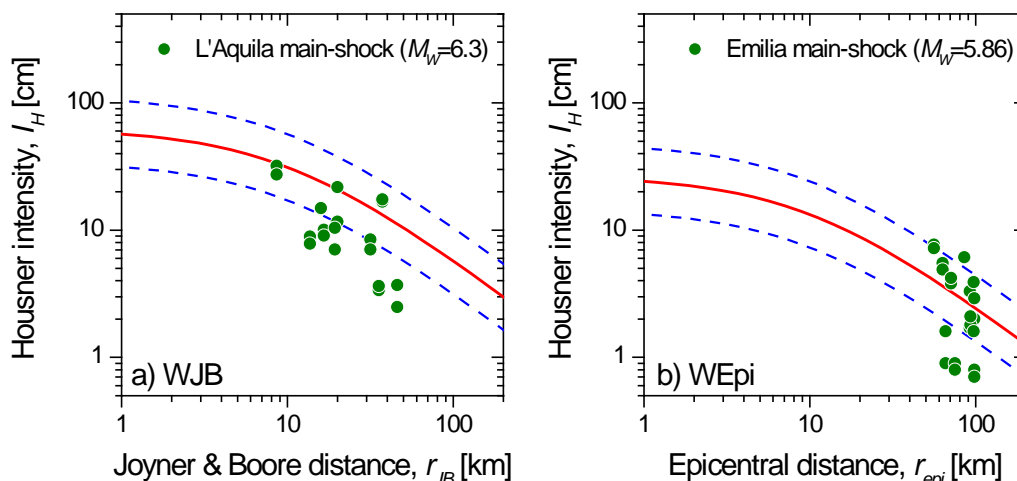


Figura 6. Confronto tra i valori stimati di  $I_H$  e quelli calcolati per le registrazioni di (a) main-shock della sequenza sismica aquilana (2009) ( $M_W = 6.3$ ) e (b) main shock della sequenza sismica emiliana (2012) ( $M_W = 5.86$ ).

A titolo di esempio, nelle figure 5a e 5b si riportano i confronti tra i valori calcolati con la relazione (8) e quelli ottenuti a partire dalle registrazioni dei terremoti di Northridge (19/01/1971,  $M_S = 6.8$ ), del *main-shock* del terremoto irpino-lucano (23/11/1980,  $M_S = 6.8$ ) e dei due eventi principali della sequenza di South-Iceland (17/06/200 e 21/06/2000 entrambi con  $M_S = 6.6$ ). Tali registrazioni appartengono alla serie di dati con cui sono state valutate le leggi di attenuazione.

Nelle figure 6a e 6b sono, invece, mostrati i confronti tra i valori previsti dall'eq. (8) proposta in questo lavoro e i valori calcolati per le registrazioni su sito di classe A, del terremoto de L'Aquila (06/04/2009,  $M_W = 6.3$ ) e del *main-shock* della sequenza emiliana (20/05/2012,  $M_W = 5.86$ ) che non fanno parte della selezione di registrazioni utilizzata per derivare la legge di attenuazione. Per l'evento aquilano non si dispone dell'informazione sulla magnitudo delle onde di superficie, pertanto si è considerata la relazione WJB. La previsione risulta cautelativa per la maggior parte delle registrazioni, ciò può essere imputato all'attenuazione anelastica del moto, che si risente già a partire da poche decine di chilometri dal piano di faglia (Sabetta et al., 2009). Per l'evento emiliano, invece, si è considerata la relazione WEpi, non essendo ancora disponibili le informazioni sulla geometria della sorgente sismogenetica responsabile del sisma. La legge proposta sembra cogliere in maniera soddisfacente la variabilità misurata.

## Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro è stato quello di mettere a punto gli elementi necessari alla definizione della curva di pericolosità degli spostamenti dei pendii secondo un approccio *performance-based* in funzione dell'Intensità di Housner e dell'accelerazione massima.

L'utilizzo di questa coppia di parametri si è dimostrato più affidabile rispetto ad altri criteri presenti nella letteratura nazionale ed internazionale, in particolare nel confronto tra i valori di spostamento calcolati per gli accelerogrammi del terremoto aquilano.

Si è, inoltre, voluto mettere in evidenza che i criteri normalmente utilizzati per valutare l'efficienza di queste relazioni possono non essere sufficienti a garantire l'effettiva validità della legge di regressione al di fuori del contesto delle registrazioni utilizzate per la sua messa a punto.

A completamento della procedura si è indicata una possibile legge di attenuazione dell'Intensità di Housner in funzione di magnitudo e distanza, per sito di classe A. Questa

legge può essere agevolmente utilizzata per il territorio italiano a partire dai i valori di magnitudo e di distanza di Joyner & Boore indicati dalla “Mappa di disaggregazione della Pericolosità Sismica” (Spallarossa & Barani, 2007) oppure, in alternativa, attraverso la distanza epicentrale e la magnitudo momento. La relazioni può risultate efficace anche per studi riguardanti la pericolosità sismica sugli edifici per i quali l’intensità di Housner si dimostra un buon indicatore dell’intensità macrosismica e del danneggiamento (Vona et al., 2009; Mucciarelli et al., 2007).

## Bibliografia

- Ausilio, E., Silvestri, F., Tropeano, G. (2007). *Simplified relationships for estimating seismic slope stability*. ISSMGE – ETC12 Workshop: ‘Geotechnical aspects of EC8’. September 24-27, Madrid, Spain.
- Baker, JW, Cornell, CA., (2005). *A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, **34** (10), 1193–1217.
- Bray, J.D., and Travasarou, T. (2007). *Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE **133**(4): 381–392.
- Gazzaneo, D. (2009). *Relazioni empirico-probabilistiche per la stima degli spostamenti co-sismici di pendii omogenei*. Tesi di Laurea Specialistica, Università della Calabria, 2009.
- Kramer, S.L. (2009). *Role of soil investigation in performance-based design*. Proceedings, International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, Tsukuba, Japan, Invited Paper, 8 pp.
- Luco, N, and Cornell, C.A., (2007). *Structure-specific scalar intensity measures for near-source and ordinary earthquake ground motions*. Earthquake Spectra, **23** (2), 357– 392. DOI: 10.1193/1.2723158.
- Madiai C. (2009). *Correlazioni tra parametri del moto si-smico e spostamenti attesi del blocco di Newmark*. Rivista Italiana di Geotecnica, 1/09, pp. 23-43.
- Mucciarelli, M., Pacor, F., Gallipoli, M.R., Masi, A., Vona, M., Samela, L., Parolai, S., Strollo, A., Gunther, E. (2007). *Task 5 – Potenza – Deliverables D18, D19, D24 – Effetti di sito e scenari di danno*. Rapporto di Ricerca Progetto INGV-S3. Scenari di scuotimento in aree di interesse prioritario e/o strategico.
- Newmark, N.W. (1965). *Effects of earthquakes on dams and embankments*. The V Rankine Lecture of the British Geotechnical Society, Géotechnique, 15 (2), 139-160.
- Sabetta, F., Rovelli, A., Celebi, M., Rinaldis, D. (2009). *Sequenza sismica dell’Abruzzo: analisi delle registrazioni accelerometriche*. ENEA- Energia Ambiente e Innovazione, 55 (3), 12-28.
- Saygili, G., and Rathje, E. M. (2008). *Empirical predictive models for earthquake-induced sliding displacements of slopes*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, **134**(6), 790-803.
- Shome, N, Cornell, CA, Bazzurro, P, Carballo, JE., (1998). *Earthquakes, records, and nonlinear responses*. Earthquake Spectra, **14** (3), 469–500.
- Spallarossa, D., and Barani, S. (2007). *Disaggregazione della pericolosità sismica in termini di M-R-e*. Progetto DPC-INGV SI, <http://esse1.mi.ingv.it/d14.html>.
- Tothong, P, and Luco, N. (2007). *Probabilistic seismic demand analysis using advanced ground motion intensity measures*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics; **36** (13), 1837–1860.
- Tropeano, G., Ausilio, E., Costanzo, A., Silvestri, F. (2009). *Valutazione della stabilità sismica di pendii naturali mediante un approccio semplificato agli spostamenti*. XIII Convegno Nazionale “L’Ingegneria Sismica in Italia (ANIDIS 2009)”, Bologna.



- Vamvatsikos, D, Cornell, CA., (2005). *Developing efficient scalar and vector intensity measures for IDA capacity estimation by incorporating elastic spectral shape information*. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; **34** (13), 1573–1600.
- Vona, M., Puglia, R., Masi, A., Silvestri, F. (2009). *Confronto tra il danno rilevato sugli edifici di San Giuliano di Puglia a seguito del terremoto del 2002 ed il danno stimato sulla base di differenti modelli di definizione del moto sismico in superficie*. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 43(3):72-82. Patron, Bologna.
- Yegian, M.K., Marciano, E.A., Gharaman, V.G. (1991). *Earthquake-induced permanent displacement deformations: probabilistic approach*. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **117** (1), 35-50.