

UN APPROCCIO PER LA VALUTAZIONE DEL NUMERO DI CICLI IN INGEGNERIA GEOTECNICA SISMICA

Massimina Castiglia
Università degli Studi del Molise
cmassy88@yahoo.it

Filippo Santucci de Magistris
Università degli Studi del Molise
filippo.santucci@unimol.it

Sommario

Il numero di cicli equivalenti di un terremoto, N_c , rappresenta un parametro d'interesse in ingegneria geotecnica sismica e, in particolar modo, nell'ambito delle problematiche di liquefazione ed instabilità dei pendii. Con riferimento al fenomeno di liquefazione esistono, in letteratura, molteplici procedure per la stima di N_c , alcune delle quali richiedono specifiche analisi di risposta sismica locale. Queste ultime, come noto, necessitano di una caratterizzazione avanzata del terreno non sempre disponibile, sebbene tale caratterizzazione sia comunque necessaria per lo studio delle deformazioni connesse alla dissipazione delle sovrappressioni neutre. Focalizzando l'attenzione sul calcolo del numero di cicli equivalenti di un terremoto, sono state scelte due procedure semplici ed efficaci per la stima di N_c da applicare direttamente sull'accelerogramma. Esse consentono di trasformare la reale storia deformativa imposta dal sisma in sito in una equivalente di ampiezza uniforme, in grado di produrre lo stesso livello di danno nel terreno, basandosi su un'equivalenza di carattere energetico. Con riferimento al contesto nazionale italiano, più volte interessato nel corso degli anni da fenomeni di liquefazione, di cui si ricordano gli ultimi eventi manifestatisi in occasione del terremoto de L'Aquila del 2009 e dell'Emilia Romagna del 2012, l'obiettivo è quello di fornire delle leggi predittive valide per la sismicità italiana. L'utilizzo del numero di cicli equivalenti, nelle problematiche di liquefazione, consente una stima delle sovrappressioni neutre indotte dall'evento sismico ed è utile per la valutazione della suscettibilità al fenomeno.

1. Selezione degli eventi sismici

L'obiettivo di questo lavoro è quello di ottenere il numero di cicli equivalenti di terremoti registrati e, sulla base di tali valori, effettuare delle analisi di regressione, al fine di pervenire a leggi previsionali utili per valutare il rischio di liquefazione sul territorio italiano. La selezione degli eventi sismici è stata effettuata tramite il portale di riferimento per la sismicità italiana, ITACA, dal quale sono state estrapolate le registrazioni accelerometriche rispondenti ai seguenti criteri: registrazioni disponibili in formato corretto; registrazioni eseguite in condizioni di campo libero; eventi di magnitudo superiore o uguale a 4; registrazioni di eventi con epicentro su terra ferma; disponibilità di entrambe le componenti orizzontali del moto sismico NS ed EW; eventi generati da un meccanismo focale di tipo normale, inverso e trascorrente; registrazioni su classe di sottosuolo A, B, C, D ed E; registrazioni che interessano una classe topografica T1, T2, T3 e T4. In definitiva, considerando le due componenti orizzontali degli eventi sismici, si ha a disposizione un totale di 3328 registrazioni. La maggior parte di queste è caratterizzata da valori molto bassi di accelerazione massima e, pertanto, sono state scartate tutte quelle con $PGA < 0.05g$. La scelta di tale soglia è compatibile con le evidenze di letteratura (i.e., Santucci de Magistris, 2015) che mostrano casi di liquefazione per valori di PGA più bassi rispetto a quanto indicato nelle NTC2008. Con questa ulteriore restrizione, il numero di registrazioni si riduce a 448. L'utilizzo di accelerazioni più piccole avrebbe prodotto una maggiore dispersione dei dati e

analisi poco rappresentative, perché caratterizzate da valori singolari elevati del numero dei cicli.

2. Procedure per il calcolo del numero di cicli equivalenti

Le procedure di conversione, note in letteratura, differiscono per le modalità con cui vengono individuati i cicli da convertire, per i criteri di scelta della curva di resistenza a liquefazione, ove prevista, per il criterio adottato nella determinazione del contributo del singolo ciclo di carico al valore complessivo del numero di cicli e, in qualche caso, per l'ampiezza della storia di carico equivalente. Nella conversione saranno prese in esame le sole componenti orizzontali delle registrazioni, assumendo che le componenti verticali del moto sismico non forniscano un significativo contributo alla nascita e al successivo sviluppo di sovrappressioni interstiziali (Idriss, 1999; Green, 2001).

2.1 Seed et al. (1975)

Nella procedura semplificata di Seed et al. (1975) si assume che per i primi 6 m circa di terreno il rapporto τ/τ_{\max} tra la tensione tangenziale indotta dal sisma in ogni ciclo di carico e il suo valore massimo sia approssimativamente uguale al rapporto a/a_{\max} tra la corrispondente accelerazione sismica in superficie e il suo valore massimo. La procedura consiste nell'individuare i picchi di una data registrazione e per ciascuno di questi calcolare il rapporto a/a_{\max} . Scelta poi la curva di resistenza a liquefazione da utilizzare, per ciascun valore del rapporto sarà noto il numero di cicli. Il numero di cicli totale si ottiene sommando tutti i cicli ottenuti per ciascun picco della registrazione. Per l'individuazione dei picchi del segnale accelerometrico si è utilizzato il Peak Counting Method, con il quale si estraggono tutti i picchi al di sopra di una soglia di accelerazione, scelta in maniera tale da trascurare quei cicli che non fornirebbero un contributo sostanziale alla valutazione del numero complessivo di cicli equivalenti. Per quanto riguarda la curva di resistenza a liquefazione, tra le varie disponibili (i.e., Biondi, 2002) in questo studio è stata scelta quella di Liu et al. (2001), ottenuta mediante prove di taglio semplice ciclico e per un'ampiezza equivalente pari al 65% della massima tensione tangenziale indotta dal sisma. Di questa e delle altre curve si riporta una rappresentazione grafica in figura 2.1 e i parametri di riferimento in tabella 2.1.

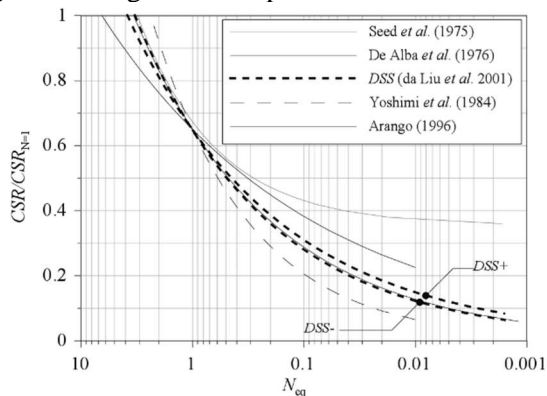


Figura 2.1: Curve di conversione (da Biondi, 2002)

Riferimento	R	m	α
Seed et al. (1975)	0,3197	0,6179	0,3539
De Alba et al. (1976)	0,6778	0,345	-
Yoshimi et al. (1984)	0,65	0,23	-
Arango (1996)	0,65	0,5	-
Liu et al. (2001)	DSS+	0,65	0,366
	DSS-	0,65	0,323

Tabella 2.1: Parametri delle curve di conversione (da Biondi, 2002)

In definitiva, il numero dei cicli equivalenti di un evento sismico è fornito dall'espressione 2.1:

$$N_c = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \left(\frac{a_i}{a_{\max}} \cdot \frac{1}{R} - \frac{\alpha}{R} \right)^{1/m} \quad 2.1$$

in cui a_i è l'ampiezza del picco i-esimo ed n il numero totale dei picchi. Tra i valori dei parametri delle curve DSS+ e DSS- è stata fatta una media aritmetica.

2.2 Hancock e Bommer (2004)

La procedura di Hancock e Bommer (2004) consente di calcolare il numero di cicli direttamente dalla

registrazione accelerometrica, valutando il contributo al danno che ogni singolo ciclo è in grado di offrire. Dato che l'accelerogramma non è simmetrico rispetto all'asse dei tempi e, quindi, le ampiezze dei cicli positivi risultano diverse da quelle dei cicli negativi, è più opportuno ragionare in termini di mezzi cicli, considerando il danno accumulato da ognuno di questi. In definitiva il numero dei cicli equivalenti tale da indurre liquefazione nel terreno è fornito dalla formulazione 2.2:

$$N_c = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{2n} \left(\frac{u_i}{u_{\max}} \right)^2 \quad 2.2$$

in cui u_i è l'ampiezza dell' i -esimo mezzo ciclo, u_{\max} è la massima ampiezza in valore assoluto tra tutti i mezzi cicli ed n è il numero totale dei mezzi cicli.

Questa procedura dipende unicamente dalla tecnica utilizzata per la conta dei cicli; nello specifico è stato scelto il Rainflow Counting Method. Tale metodo è in grado di contare cicli sia alle alte che alle basse frequenze in segnali a larga banda di frequenze e di definire un numero equivalente di cicli che bilancia i contributi relativi delle componenti del moto sismico aventi diverse ampiezze e frequenze.

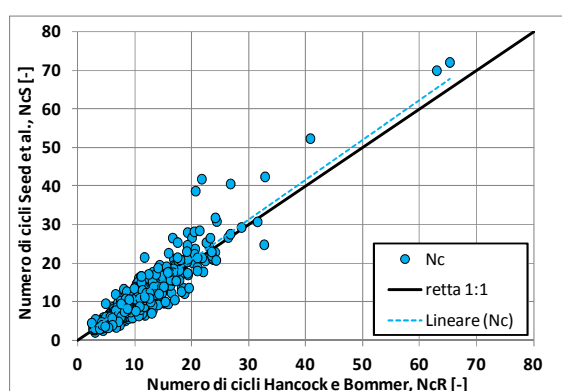


Figura 2.2: Confronto tra le due procedure

Per ogni storia temporale, la conversione è stata effettuata con riferimento agli emicicli che competono alla parte positiva ed alla parte negativa dell'accelerogramma assumendo, infine, un valore medio di N_c .

Si nota una buona corrispondenza tra i valori del numero di cicli ottenuto con le due diverse procedure (fig. 2.2), sebbene, all'aumentare di N_c si abbia una leggera sovrastima del valore ottenuto col metodo di Seed et al. (1975) rispetto a quello di Hancock e Bommer (2004).

3. Relazioni predittive per la determinazione del numero di cicli

Sulla base dei valori calcolati con la procedura di Seed et al. (1975), è stato proposto un modello previsionale per la stima del numero di cicli equivalenti nell'ambito nazionale italiano. La scelta delle variabili è avvenuta considerando quelle che risultassero meglio correlate al numero di cicli, ovvero in grado di minimizzare la differenza tra il valore stimato e quello reale, e che non risultassero affette dalla problematica di multicollinearità (Belsley et al., 1980). L'analisi di multicollinearità è stata effettuata stimando i parametri VIF (Variance Inflation Factor), CI (Condition Index) e VDP (Variance Decomposition Proportions) ed accertandosi che il VIF risultasse non elevato e che non si avessero contemporaneamente un alto valore di CI e più di due variabili con valore di VDP superiore a 0,5. Per la scelta della funzione si è proceduto attenendosi, in parte, alle formulazioni disponibili in letteratura ed, in parte, ricorrendo all'ausilio del programma TableCurve 2D, attraverso cui si è modellato N_c in funzione di ogni singola variabile indipendente per ottenere la forma che, nelle successive analisi di regressione, garantisse la minimizzazione dei residui. Per quanto riguarda i coefficienti, sono stati ottenuti mediante regressione statistica dei dati utilizzando l'algoritmo genetico, adottando come criterio di minimizzazione quello dei minimi quadrati. Vista la scarsità di registrazioni appartenenti alle categorie non pianeggianti ed accertata, mediante analisi preliminari, la scarsa influenza del meccanismo focale su N_c , le leggi predittive saranno suddivise in funzione delle sole categorie di sottosuolo; a tal proposito, le classi di sito D-E sono state considerate in maniera accorpata per i pochi eventi che le contraddistinguono e, per completezza, si è tenuto conto anche della classe di sito A, seppur generalmente non interessante per le problematiche di liquefazione. Sulla base dei suddetti criteri sono stati proposti quattro modelli previsionali (tab. 3.1, eq. 3.1 e tab 3.2):

MODELLO	PARAMETRI					
MODELLO 6V	PGA	Ripo	Ia	Tm	v ₀	PGV
MODELLO 5V	PGA	Ripo	Ia	Tm	v ₀	-
MODELLO 4V	PGA	Ripo	Ia	Tm	-	-
MODELLO 3V	PGA	Ripo	Ia	-	-	-

Tabella 3.1: Variabili predittive per ciascun modello

Le variabili scelte, nell'ordine tale da garantire di volta in volta il maggior contributo nella procedura di regressione, sono: Accelerazione di picco, PGA, espressa in g; distanza ipocentrale, Ripo, espressa in km; Intensità di Arias, Ia, espressa in m/s; periodo medio, Tm, espresso in s; frequenza di passaggi per lo zero, v₀, espresso in Hz; velocità di picco, PGV, espressa in m/s.

$$\ln(N_c) = \alpha + \beta \cdot \ln(PGA) + \gamma \cdot \exp(\log_{10}(Ripo)) + \delta \cdot \ln(Ia) + \zeta \cdot \ln(Tm) + \theta \cdot \ln(v_0) + \lambda \cdot \ln(PGV) \quad 3.1$$

Classe di sito	Modello	α	β	γ	δ	ζ	θ	λ	σ
A	6V	-0,677	-2,104	-0,013	0,927	-0,536	0,288	0,201	0,191
	5V	-0,587	-1,979	-0,037	0,974	-0,375	0,285	-	0,229
	4V	0,341	-1,895	-0,098	0,916	-0,417	-	-	0,423
	3V	0,946	-1,648	-0,059	0,785	-	-	-	0,770
B	6V	-0,247	-2,088	-0,083	0,984	-0,535	0,205	0,115	0,927
	5V	-0,233	-2,013	-0,087	1,007	-0,431	0,211	-	0,935
	4V	0,357	-1,986	-0,128	0,998	-0,539	-	-	1,098
	3V	1,462	-1,693	-0,189	0,807	-	-	-	1,503
C	6V	-0,355	-2,322	-0,057	1,079	-0,877	0,040	0,237	0,808
	5V	-0,378	-2,111	-0,054	1,102	-0,632	0,096	-	0,872
	4V	-0,104	-2,062	-0,062	1,087	-0,681	-	-	0,931
	3V	1,481	-1,576	-0,189	0,785	-	-	-	1,309
D-E	6V	-0,122	-2,265	-0,150	1,009	-0,483	0,243	0,194	0,922
	5V	-0,113	-2,134	-0,153	1,052	-0,335	0,242	-	0,957
	4V	0,442	-2,095	-0,183	1,039	-0,473	-	-	1,091
	3V	1,313	-1,426	-0,033	0,735	-	-	-	1,427
TUTTE	6V	-0,229	-2,133	-0,101	1,009	-0,529	0,189	0,101	0,903
	5V	-0,229	-2,059	-0,102	1,026	-0,438	0,198	-	0,917
	4V	0,310	-2,007	-0,131	1,004	-0,533	-	-	1,048
	3V	1,485	-1,593	-0,170	0,779	-	-	-	1,454

Tabella 3.2: Coefficienti delle leggi di attenuazione proposte

Dalle analisi condotte, come indicato anche da altri autori (ad es. Seed et al., 1975; Green, 2001; Di Filippo et al., 2013), è emerso che modelli nei quali si ha dipendenza da parametri sismici correlati al contenuto energetico ed in frequenza della registrazione conducono a previsioni più accurate.

Classe di sito	Modello	5° Percentile	95° Percentile	Media	Mediana	Deviazione Standard
A	6V	-1.326	2.361	0.082	-0.030	1.220
	3V	-2.355	3.502	0.171	-0.039	2.175
B	6V	-3.184	4.763	0.079	-0.024	2.571
	3V	-6.819	6.701	-0.235	-0.036	4.534
C	6V	-2.529	4.306	0.221	-0.013	2.246
	3V	-3.975	7.826	0.475	-0.030	3.692
D-E	6V	-2.168	4.601	0.242	-0.041	2.519
	3V	-6.002	7.117	0.413	0.015	4.172
TUTTE	6V	-2.814	4.786	0.242	-0.003	2.458
	3V	-5.021	7.425	0.472	-0.002	4.262

Tabella 3.3: Indicatori statistici per i modelli 6V e 3V

Per garantire una più chiara comprensione dei risultati ottenuti, il controllo, per ciascun modello, è stato effettuato in termini statistici sui residui, utilizzando come indicatori il 5° e il 95° percentile, media, mediana e deviazione standard (tab. 3.3).

Il miglior modello previsionale è quello 6V, per il quale si registrano i valori più bassi degli indicatori statistici scelti, tuttavia, il modello 3V rappresenta ancora un buon compromesso tra bontà dei risultati e facilità di calcolo delle variabili richieste.

Al fine di validare le leggi predittive, è stato effettuato un confronto tra il numero di cicli predetto con i modelli proposti in questo studio e con quelli di Di Filippo et al. (2013), per tutte le classi di sito, relativamente alla banca dati presentata in questo lavoro, rispetto al numero di cicli calcolato con la procedura di Seed et al. (1975) (fig. 3.1). Le leggi di attenuazione proposte forniscono valori di N_c più aderenti alla retta 1:1 e, pertanto, più efficaci a meno del MODELLO 3V, che restituisce risultati pressoché simili. Emerge ancora una volta l'importanza di parametri correlati al contenuto in frequenza dell'evento sismico nella stima di N_c , di cui è funzione il modello 3D degli autori che ne migliora la previsione.

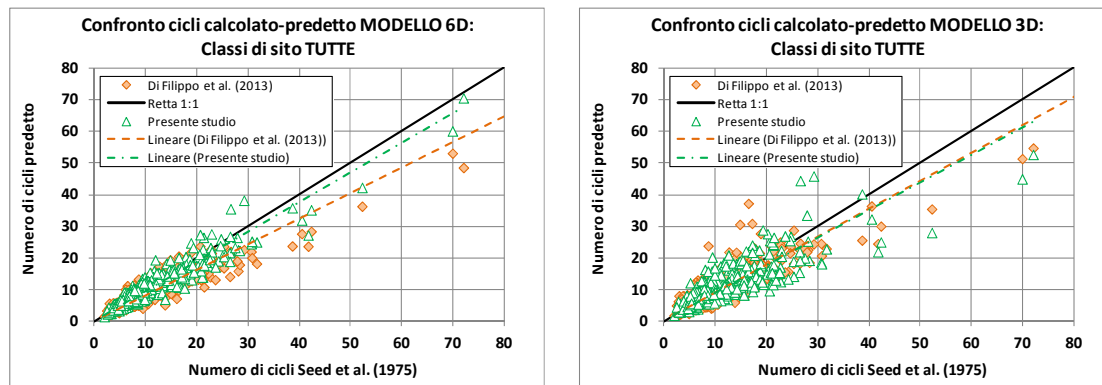


Figura 3.1: Confronto tra il numero di cicli

Se si intende effettuare un'analisi a posteriori, le variabili indipendenti sono reperibili nel portale ITACA o, comunque, facilmente calcolabili. Tuttavia, per un'eventuale analisi predittiva di rischio sismico, non sono note a priori, pertanto, per agevolare il calcolo di N_c , laddove non si disponga delle variabili necessarie per l'applicazione dei modelli previsionali, oppure per la valutazione di un parametro d'interesse nell'ambito nazionale italiano, sono state sviluppate ulteriori leggi di attenuazione delle variabili di cui sono funzione le leggi predittive di cui sopra. Le relazioni sono state ottenute con gli stessi criteri, ma sono state calibrate sulla banca dati costituita da 3328 registrazioni. Le variabili utilizzate sono Ripo (Distanza ipocentrale, espressa in km), M (Magnitudo locale), PGA (Accelerazione di picco, espressa in g), meccanismo focale ($F1=1$ ed $F2=0$ Faglia normale; $F1=0$ ed $F2=1$ Faglia inversa; $F1=0$ ed $F2=0$ Faglia trascorrente) e classe di sito ($S1=1$, $S2=0$ ed $S3=0$ Classe di sito A; $S1=0$, $S2=1$ ed $S3=0$ Classe di sito B; $S1=0$, $S2=0$ ed $S3=1$ Classe di sito C; $S1=0$, $S2=0$ ed $S3=0$ Classe di sito D-E). Le prime tre grandezze sono ricavabili da un'analisi di pericolosità sismica di un dato sito, il meccanismo focale è conosciuto per la zona sismogenetica di interesse e la classe di sito è nota se sono disponibili risultati di prove geotecniche per la caratterizzazione del sito. La legge di attenuazione della PGA è fornita dall'espressione 3.2, quella di I_a , T_m , v_0 e PGV dalla formulazione 3.3, in cui x è il parametro di riferimento.

$$\log_{10}(PGA) = a + b \cdot M + c \cdot M^2 + (d + e \cdot M) \cdot \log_{10}(Ripo) + f1 \cdot F1 + f2 \cdot F2 + s1 \cdot S1 + s2 \cdot S2 + s3 \cdot S3 \quad 3.2$$

$$\log_{10}(x) = a + b \cdot M + c \cdot \log_{10}(PGA) + d \cdot \log_{10}(Ripo) + f1 \cdot F1 + f2 \cdot F2 + s1 \cdot S1 + s2 \cdot S2 + s3 \cdot S3 \quad 3.3$$

	a	b	c	d	e	f1	f2	s1	s2	s3
PGA	0,735	-0,429	0,093	-2,207	0,085	0,032	0,088	-0,246	-0,180	0,010
I_a	-1,471	0,390	1,601	-0,105	-	0,088	0,096	-0,218	-0,149	-0,029
T_m	-2,291	0,346	-0,245	-0,221	-	0,056	0,000	-0,180	-0,103	-0,004
v₀	2,252	-0,232	0,035	0,024	-	-0,026	0,027	0,145	0,098	0,013
PGV	-2,222	0,370	0,738	-0,234	-	0,052	0,013	-0,172	-0,095	-0,002

Tabella 3.4: Tabella riepilogativa dei coefficienti con suddivisione per meccanismo focale e classi di sito

Per ovviare all'eventuale mancanza di informazioni circa il meccanismo focale e la classe di sito, sono stati messi a disposizione modelli privi di tali variabili.

	a	b	c	d	e
PGA	0,167	-0,409	0,108	-1,698	-0,018
Ia	-1,368	0,361	1,641	-0,068	-
Tm	-2,261	0,334	-0,213	-0,196	-
v₀	2,270	-0,224	0,007	-0,006	-
PGV	-2,198	0,360	0,764	-0,215	-

Tabella 3.5: Tabella riepilogativa dei coefficienti senza distinzione per meccanismo focale e classi di sito

Tutte le operazioni di calcolo numerico presentate in questo lavoro, dal trattamento dei dati alla stima dei coefficienti delle leggi predittive, sono state svolte mediante opportuni script realizzati in linguaggio di programmazione MATLAB.

4. Conclusioni

Sono state descritte due procedure semplificate per il calcolo del numero dei cicli da compiersi direttamente sull'accelerogramma, applicate ad un totale di 448 registrazioni italiane selezionate dal portale ITACA. Dalle analisi è emerso che esse conducono a risultati sostanzialmente simili. Sulla base dei valori così ottenuti, sono stati sviluppati 4 modelli previsionali, la cui affidabilità è stata valutata attraverso un confronto sistematico tra valori stimati e calcolati. I parametri scelti sono risultati quelli meglio correlati al numero dei cicli, avendo restituito uno scarto residuale minore e valori più bassi degli indicatori statistici utilizzati. Lo studio ha evidenziato la scarsa influenza del tipo di faglia sul valore finale del numero dei cicli, nonché l'importanza di parametri correlati al contenuto in frequenza dell'evento sismico nella stima di N_c . Per concludere, è importante ricordare che le leggi predittive sono state calibrate per la sismicità italiana e, pertanto, la loro applicazione in altri contesti esula dal particolare scopo della loro caratterizzazione ed è necessario valutarne l'affidabilità.

Bibliografia

- Belsley D.A., Kuh E., Welsch R.E. (1980). *Regression Diagnostics: Identifying Influential Data and Sources of Collinearity*. Wiley Interscience, New York.
- Biondi G. (2002). *Instabilità sismica dei pendii sabbiosi causata da incrementi di pressione interstiziale*. Tesi di Dottorato in Ingegneria Geotecnica, Università di Catania.
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (2008). *Norme tecniche per le costruzioni*, D.M. 14 Gennaio.
- Di Filippo G., Biondi G., Cascone E. (2013). *Nuovi modelli previsionali per la valutazione del numero di cicli di carico equivalente*. Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2013- IARG 2013 Perugia.
- Green R.A. (2001). *Energy-based Evaluation and Remediation of Liquefiable Soils*. Tesi di Dottorato, Virginia Polytechnical Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Hancock J., Bommer J. J. (2004). *Predicting the number of cycles of ground motion*, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1989, Vancouver.
- Idriss I.M. (1999). *An update to the Seed-Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential*. Proc. TRB workshop on New Approaches to Liquef., Publication No. FHWA-RD-99-165, Federal Highway Adm.
- Liu A.H., Stewart J.P., Abrahamson N.A., Moriwaki Y. (2001). *Equivalent Number of Uniform Stress Cycle for Soil Liquefaction Analysis*. Journal of Geotech. and Geoenviron. Eng., Vol. 127, No. 12, pp. 1017-1026.
- Santucci de Magistris F. (2015). *The occurrence of liquefaction at low acceleration level*. Submitted to 6 ICEGE, Christchurch, New Zealand.
- Seed H.B., Idriss I.M., Makdisi F., Banerjee N. (1975). *Representation of irregular stress time histories by equivalent uniform stress series in liquefaction analysis*. Report EERC 75-29, University of California.