

## **PROGETTO VEL DELLA REGIONE TOSCANA: BANCA DATI DELLE PROVE DI LABORATORIO**

I. Giusti

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Pisa  
ilaria.giusti@for.unipi.it*

M. Baglione

*Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica – Regione Toscana  
massimo.baglione@regione.toscana.it*

V. D'Intinosante

*Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica – Regione Toscana  
vittorio.dintinosante@regione.toscana.it*

P. Fabbroni

*Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica – Regione Toscana  
pierangelo.fabbroni@regione.toscana.it*

D. C. Lo Presti

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Pisa  
diego.lopresti@dic.unipi.it*

### **Sommario**

Le recenti Norme Tecniche per le Costruzioni (DM 14 Gennaio 2008) hanno introdotto criteri semplificati per la definizione dell'azione sismica. Il dato di partenza è l'accelerazione orizzontale di picco al suolo su terreno roccioso per un determinato periodo di ritorno. Questa determinazione è resa possibile dalle mappe di pericolosità sismica prodotte da INGV (<http://esse1.mi.ingv.it/>, sezione "Mappe interattive della pericolosità sismica") che forniscono i suddetti valori ai vertici di una maglia quadrata, di lato 0.05°, che copre l'intero territorio nazionale. Sono possibili interpolazioni geografiche se la località non corrisponde ad un vertice della maglia o interpolazioni temporali se il periodo non corrisponde ad uno di quelli considerati da INGV.

Il passo successivo è quello di valutare la pericolosità sismica locale del sito in esame. La normativa propone una procedura semplificata basata sull'identificazione di cinque categorie di sottosuolo (A, B, C, D, E). Queste categorie sono identificate dal parametro Vs30 e corrispondono a stratigrafie semplificate. Purtroppo non sempre sono applicabili e in alcuni casi il profilo stratigrafico non corrisponde a nessuna delle cinque categorie.

In alternativa all'approccio semplificato della normativa, la definizione dell'azione sismica, sia in termini di accelerogrammi che in termini di spettri, può essere conseguita mediante analisi di risposta sismica. Questa procedura analitica (nel caso più semplice di analisi lineare-equivalente) richiede quanto segue:

- scelta di una serie di accelerogrammi spettro-compatibili e sismo-compatibili (per il sito in esame)
- determinazione di un profilo di velocità delle onde di taglio che può essere facilmente acquisito attraverso misure down – hole o di sismica di superficie (MASW, rifrazione in onde SH)
- parametri di rigidezza e smorzamento (cosiddette curve  $G - \gamma$  e  $D - \gamma$ )

I parametri di rigidezza e smorzamento possono essere determinati unicamente mediante apparecchiature disponibili in Laboratori Universitari e di Ricerca. Nelle analisi di risposta sismica il rapporto di smorzamento gioca un ruolo rilevante e, allo stato attuale, può essere unicamente determinato da prove di laboratorio su campioni indisturbati. La Regione Toscana, attraverso i programmi VEL (Programma di valutazione degli effetti locali dei centri urbani) e DOCUP (Programma di riduzione del rischio sismico nelle aree produttive) ha accumulato 268 prove tra CR, TXC, TTC. Questo patrimonio prezioso, unico in Italia, sarà messo a disposizione di progettisti e tecnici degli enti locali attraverso la realizzazione di una banca dati interattiva. Il presente lavoro nasce da un contratto di

ricerca tra la Regione Toscana e l'Università di Pisa nell'ambito del quale è stata eseguita la classificazione di 250 campioni prelevati nelle aree dei progetti VEL e DOCUP e la costruzione di una banca dati di tutti i campioni e di tutte le prove di laboratorio di tipo dinamico eseguite nell'ambito del programma. Tale banca dati può essere interrogata secondo numerosi criteri di selezione e permette di costruire, attraverso le equazioni di Yokota (*Yokota et al. 1981*), le curve di decadimento  $G - \gamma$  e  $D - \gamma$  che meglio si adattano ai dati sperimentali relativi ad una serie di prove selezionate.

### **Il programma regionale di Valutazione degli Effetti Locali nei centri urbani, edifici strategici e rilevanti (Programma VEL) e nelle aree produttive (Programma DOCUP)**

La Regione Toscana ha avviato fin dal 1982 una serie di programmi di attività per la valutazione del rischio sismico regionale. Tali attività sono state inquadrate nella L.R.56/1997 e successivamente nella nuova Legge Regionale L.R. 58 del 16 Ottobre 2009 che definisce le strategie e le politiche di prevenzione sismica in Toscana, individuando altresì i criteri di priorità di intervento ed i canali di finanziamento. Tra le molte attività di cui alla suddetta legge, connesse principalmente alla valutazione della vulnerabilità degli edifici ed alla realizzazione di interventi preventivi di adeguamento e miglioramento sismico di edifici pubblici e privati, rientrano anche gli studi per la caratterizzazione dei terreni ai fini sismici sia relativi ad analisi di valutazione degli effetti locali, sia per il raggiungimento dei livelli di conoscenza del modello geologico-tecnico di sottosuolo propedeutico alle attività progettuali previste dal DM 14 Gennaio 2008. Per quanto concerne gli studi di valutazione degli effetti locali sui terreni, la Regione Toscana dopo il 1997 ha avviato il Programma Regionale VEL.

La fase sperimentale del progetto ha interessato i principali centri urbani della Lunigiana e Garfagnana. In queste zone è stata messa a punto la metodologia operativa che è stata poi adottata anche in altre zone classificate sismiche della Toscana quali il Mugello, la ValTiberina, il Casentino, l'Amiata e il Pistoiese. Il Programma regionale di Valutazione degli Effetti Locali (VEL) intende valutare ed individuare all'interno di ambiti territoriali a scala sub-comunale (frazioni e centri), le aree a comportamento omogeneo sotto il profilo della risposta sismica locale in corrispondenza di un terremoto atteso, definendo così i possibili effetti sui principali centri urbani, sulle reti di servizio e sulle infrastrutture di comunicazione.

I risultati delle indagini effettuate nell'ambito del Programma VEL consistono in una serie di informazioni da utilizzare nella fase di pianificazione urbanistica (carte geologiche, geomorfologiche, litologico - tecniche, delle zone a maggiore pericolosità sismica locale, dati geotecnici ottenuti da prove in sito e di laboratorio, carte di microzonazione sismica a scala sub-comunale), in fase progettuale e per il miglioramento ed adeguamento sismico degli edifici (spettri di risposta e fattori di amplificazione ottenuti da analisi di modellazione numerica). Il Programma VEL è stato avviato in 83 Comuni (tra quelli classificati a maggior rischio sismico) per un totale di circa 192 centri urbani, in cui sono stati realizzati rilievi geologici e geomorfologici a scala 1:2.000 su un totale di circa 37.300 ettari di territorio. Le indagini eseguite consistono in circa 1040 linee di sismica a rifrazione con onde P e SH (per un totale di 110Km), n. 466 sondaggi geotecnici con prove SPT in foro e prove down-hole in foro (per un totale di circa 15 Km); inoltre è stato realizzato per circa 15 Comuni il monitoraggio strumentale combinato di rumore ed eventi sismici, al fine di acquisire una caratterizzazione in termini di frequenze dei siti. Nel corso dei sondaggi sono stati prelevati 506 campioni indisturbati di terreno su cui sono state eseguite n. 490 prove statiche e n. 270 prove dinamiche di laboratorio. I risultati ottenuti sono resi disponibili agli enti locali, alle categorie economiche, al mondo professionale attraverso una banca dati disponibile sul sito web: [http://www.rete.toscana.it/sett/pta/sismica/lr56/VEL/index\\_vel.htm](http://www.rete.toscana.it/sett/pta/sismica/lr56/VEL/index_vel.htm).

### **Struttura della banca dati**

I campioni prelevati nelle aree dei Programmi VEL e DOCUP sono stati classificati secondo il sistema USCS (ASTM D 2487-00) modificato per le esigenze del progetto. Per quanto

riguarda i terreni a grana grossa (passante al setaccio n°200 (0.075 mm) < 50%) la classificazione adottata corrisponde alla classificazione USCS; per i terreni a grana fine invece sono state introdotte categorie aggiuntive per tener conto delle varie percentuali di sabbia o ghiaia.

Una volta eseguita la classificazione dei campioni, sono stati compilati i file necessari per l'importazione dei dati nella banca dati. La banca dati è stata realizzata implementando un "Personal Geodatabase" in ArcGis; è suddivisa in tabelle corrispondenti a ciascuna delle zone dei programmi VEL e DOCUP (Amiata, Casentino, Garfagnana, Provincia di Livorno, Lunigiana, Mugello, Provincia di Pistoia, Provincia di Siena, Valdichiana, Valtiberina). Per ogni area sono state create diverse tabelle: una tabella che raccoglie tutti i campioni prelevati nell'area analizzati e classificati, una tabella per ogni tipologia di prova che raccoglie tutti i dati relativi alla prova stessa, ed una tabella, per ogni tipo di prova, che raccoglie tutti i risultati delle prove di quella tipologia. Le tabelle così costruite sono state importate nella banca dati e georeferenziate attraverso il collegamento agli shape-file dei sondaggi. Attraverso l'utilizzo di un sistema di codici e di opportune relazioni tra le tabelle costituenti il GeoDataBase, ogni campione, ogni prova ed i risultati di ogni prova risultano georeferenziate ed individuabili attraverso molteplici criteri di selezione: criteri geografici, per litologia, per formazione geologica, per profondità del campione ed, in generale, qualsiasi criterio relativo ai campi che compongono le tabelle della banca dati. La selezione non ha alcuna limitazione del numero di prove.

La prima tabella riguarda la classificazione dei campioni prelevati. Per ogni campione vengono specificati i seguenti campi: Comune di appartenenza, codice alfanumerico ISTAT del Comune, nome del sondaggio (univoco sull'area comunale), nome del campione, profondità superiore e inferiore del campione, formazione geologica come riportata nei certificati, simbolo del gruppo a cui appartiene il campione secondo la classificazione USCS, simbolo del gruppo a cui appartiene il campione secondo la classificazione USCS modificata, percentuale di passante al setaccio n° 200 (0.075 mm) e n°4 (4.75 mm), limite liquido, limite plastico e indice di plasticità, laboratorio che ha eseguito le prove, prove eseguite (RC, TTC, TXC).

La seconda tipologia di tabelle raccoglie i dati relativi alle varie prove: nome della prova come riportato sul certificato del laboratorio, codice identificativo della prova che la individua sul territorio regionale, profondità superiore e inferiore della porzione specifica di campione su cui è stata eseguita la prova, indice dei vuoti iniziale, peso unitario umido iniziale, tensione efficace assiale e radiale di consolidazione.

La terza tipologia di tabelle raccoglie i risultati delle prove di colonna risonante, taglio torsionale ciclico e triassiali cicliche. Le curve di decadimento  $G - \gamma$  e  $D - \gamma$  vengono riportate in forma tabellare compilando per ogni prova i seguenti campi: identificativo della prova, modulo di taglio  $G(\gamma)$  relativo alla deformazione  $\gamma$ , rapporto tra il modulo  $G(\gamma)$  ed il valore iniziale di  $G$  ricavato nella prova, valore della deformazione di taglio, valore del rapporto di smorzamento  $D(\gamma)$ . Ogni riga della tabella corrisponde ai valori di  $G$ ,  $G/G_{max}$  e  $D$  relativi ad uno stesso valore di  $\gamma$ . I valori di  $G$ ,  $G/G_{max}$ ,  $D$  e  $\gamma$  relativi ad una stessa prova riportano i dati identificativi della prova di colonna risonante a cui appartengono. Nel caso delle prove di taglio torsionale ciclico oltre ai valori del modulo di taglio  $G(\gamma)$ , del rapporto  $G/G_{max}$ , del rapporto di smorzamento  $D(\gamma)$  viene indicato anche il numero di cicli corrispondente (sono stati riportati i cicli più significativi). Nel caso delle prove triassiali cicliche vengono indicati: numero di cicli, modulo Young  $E(\epsilon_{SA})$  relativo alla deformazione assiale  $\epsilon_{SA}$  in singola ampiezza, rapporto tra il modulo  $E(\epsilon_{SA})$  ed il valore iniziale di  $E$  ricavato nella prova, valore  $\epsilon_{SA}$  della deformazione assiale in singola ampiezza, valore del rapporto di smorzamento  $D(\epsilon_{SA})$ . Il software ArcGis permette poi di esportare in un file di Excel le prove selezionate secondo il criterio desiderato; in questo modo è possibile analizzare i dati sperimentali selezionati ed ottenere attraverso una regressione lineare la formulazione analitica che meglio li rappresenta.

A tale fine all'interno della banca dati è possibile, una volta selezionati i risultati relativi ad una serie di prove, ottenere con il metodo dei minimi quadrati le curve di decadimento secondo le equazioni di Yokota (*Yokota et al. 1981*). Le equazioni proposte da Yokota, a differenza di altre equazioni disponibili in letteratura, non richiedono la conoscenza del valore della resistenza a taglio:

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \alpha \cdot \gamma^\beta} \quad D = D_{max} \cdot e^{-\lambda \frac{G}{G_0}}$$

dove  $\gamma$  è la deformazione a taglio espressa in (%);  $D$  è espresso in (%);  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\lambda$  e  $D_{max}$  sono parametri da determinare.

### Implementazione della banca dati

Le prove analizzate sono state eseguite da tre laboratori: ISMGEO s.r.l. di Seriate, Laboratorio di Geotecnica del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa, Laboratorio DIPLAB Geomeccanica del Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica del Politecnico di Torino. Le analisi riguardano 70 Comuni, i campioni analizzati sono 250, le prove inserite nella banca dati sono 268 (233 le prove di colonna risonante, 26 quelle di taglio torsionale ciclico e 9 le prove triassiali cicliche). Tutte le prove di laboratorio sono state revisionate prima dell'inserimento nella banca dati ed è stato eseguito il controllo della qualità dei campioni classificati. La Tabella 1 riporta una sintesi delle prove analizzate e contenute nella banca dati. Sono state inserite nella banca dati anche una serie di prove di colonna risonante eseguite dal Laboratorio di Geotecnica dell'Università di Pisa al di fuori del Programma VEL. Tali prove sono relative a campioni prelevati nei Comuni di Pisa, Livorno e Lucca.

Tabella 1. Sintesi dei campioni analizzati e delle prove inserite nella banca dati

	NUMERO COMUNI	NUMERO CAMPIONI	NUMERO CR	NUMERO TTC	NUMERO TTC
AMIATA	7	19	19	0	0
CASENTINO	8	35	35	0	0
GARFAGNANA	11	29	26	9	1
LIVORNESE	4	21	17	2	2
LUNIGIANA	12	21	18	4	2
MUGELLO	12	49	45	8	4
PISTOIESE	3	5	5	0	0
SENESE	3	18	16	2	0
VALDICHIANA	2	5	5	0	0
VALTIBERINA	5	34	33	1	0
EXTRA-VEL	3	14	14	0	0
TOT	70	250	233	26	9
			268		

### Confronto dei valori di $G_0$ ricavati da prove in sito e da prove di laboratorio

Si riportano di seguito alcune analisi eseguite sulla base dei dati acquisiti. In particolare sono stati confrontati i valori del modulo di rigidezza a piccole deformazioni ( $G_0$ ) ricavati dalle prove in sito (down-hole) con quelli ricavati dalle prove di laboratorio di colonna risonante e taglio torsionale ciclico. Nota la profondità del campione, dalle prove down-hole è stato ottenuto il valore della velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_s$ , con la quale è possibile ricavare  $G_0$  attraverso la nota relazione:

$$G_0 = \rho \cdot V_s^2$$

nella quale  $\rho$  è la densità ( $\gamma/g$ ). I valori ottenuti non sono stati confrontati direttamente con i valori ottenuti dalle prove di laboratorio ( $G_{0lab}$ ), ma per quest'ultimi è stata utilizzata la seguente relazione:

$$G_{0conf} = G_{0lab} \sqrt{\frac{\sigma'_{sito}}{\sigma'_{lab}}}$$

nella quale  $\sigma'_{sito} = \frac{\sigma'_{v0} + \sigma'_{h0}}{2}$  e  $\sigma'_{lab}$  è la tensione di consolidazione della prova.

Per la determinazione delle tensioni geostatiche sono stati considerati i risultati delle prove edometriche eseguite sullo stesso campione. Nei casi in cui non sono state eseguite le prove edometriche si è fatto riferimento al valore della tensione verticale geostatica. I moduli di rigidezza così ottenuti ( $G_{0conf}$ ) sono stati confrontati con i valori ottenuti dalle indagini in sito per tutti i campioni che popolano la banca dati.

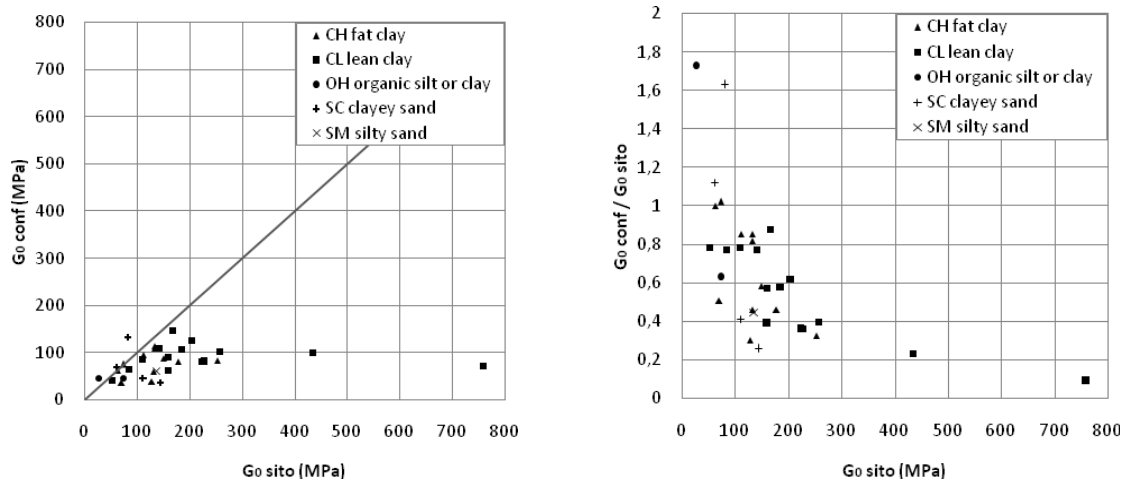


Figura 1. Confronto tra il valore del modulo di rigidezza ricavato da indagini in sito e prove di laboratorio per la zona del Mugello

In Figura 1 e Figura 2 si riportano i risultati ottenuti per alcune prove eseguite sui campioni prelevati nel Mugello. Esistono notevoli discrepanze tra i valori ottenuti dalle indagini in sito e quelli ricavabili dalle prove di laboratorio, quest'ultimi risultano generalmente inferiori ai primi, in alcuni casi il valore si riduce all' 80% di  $G_{0\text{ sito}}$ , ma nella maggior parte dei casi le riduzioni sono maggiori, fino ad ottenere valori pari al 10% di  $G_{0\text{ sito}}$ . Nei terreni prevalentemente sabbiosi si può verificare anche la situazione inversa, il campionamento provoca la compattazione del campione e questo si traduce in un aumento del valore di  $G_0$  ricavato in laboratorio. Si può inoltre notare come la differenza tra i due valori cresca al crescere della rigidezza del materiale.

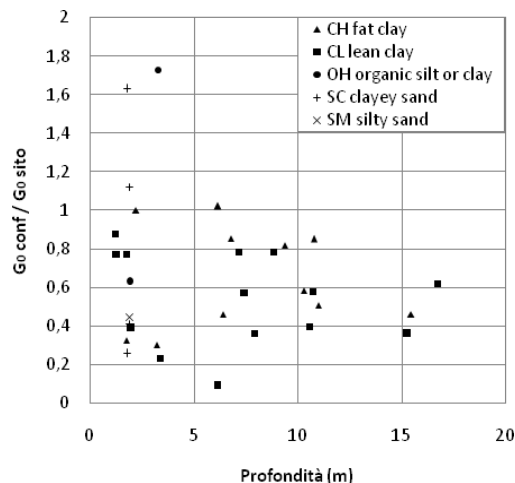


Figura 2. Rapporto tra il valore del modulo di rigidezza ricavato da indagini in sito e quello ricavato da prove di laboratorio in funzione della profondità del campione (Mugello)

Diagrammando il rapporto  $G_{0conf}/G_{0sito}$  in funzione della profondità del campione, si può osservare che risultati relativi ai campioni più profondi sono molto meno dispersi rispetto a quelli superficiali e le analisi di laboratorio hanno portato in tutti i casi, anche se non abbiamo a disposizione un numero elevato di dati, ad una notevole sottostima del valore di sito.

### Confronto delle curve di decadimento ottenute dalle analisi di laboratorio con le equazioni proposte da Vucetic e Dobry

I risultati delle prove di laboratorio sono stati divisi in funzione dell'indice plastico del campione in più categorie ( $IP < 20$ ,  $20 \leq IP < 30$  e  $30 \leq IP < 40$ ) e confrontati con le curve di Vucetic & Dobry (1991) relative ai valori di IP pari a 20, 30 e 40. La figura seguente riporta il confronto relativo alle prove eseguite nel Casentino per i campioni con indice plastico compreso tra 30 e 40.

E' possibile notare che, mentre le curve proposte approssimano piuttosto bene l'andamento dei dati sperimentali per quanto riguarda il modulo di rigidezza, questo non accade nel caso dello smorzamento. I valori del fattore di smorzamento ricavati sperimentalmente sono significativamente maggiori rispetto a quelli prevedibili con le curve di Vucetic & Dobry. In termini di analisi di risposta sismica, è lo smorzamento che ha un'influenza maggiore rispetto alle curve di decadimento del modulo di rigidezza, per cui, se si considerano attendibili i risultati prodotti dai tre diversi laboratori che hanno eseguito le prove, analizzando i risultati contenuti nella banca dati, si può concludere che risulta preferibile fare riferimento ai dati sperimentali piuttosto che alle equazioni proposte da Vucetic & Dobry.

Gli esempi riportati mostrano solo alcuni dei possibili utilizzi delle informazioni inserite nella banca dati.

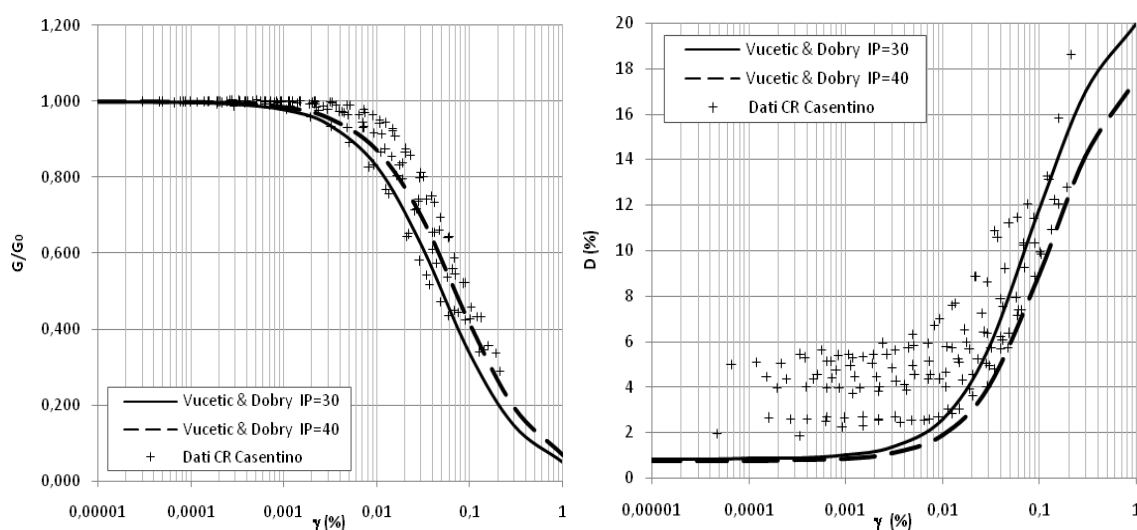


Figura 3. Confronto tra le curve di decadimento ottenute dalle prove di colonna risonante (Casentino) con le equazioni proposte da Vucetic & Dobry

### Bibliografia

ASTM D 2487-00, *Standard Practice for Classification of Soil for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*

DM 14 Gennaio 2008: *Norme Tecniche per le Costruzioni*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, 4 Febbraio 2008

Yokota K., Imai T. & Konno M. (1981). *Dynamic Deformation Characteristics of Soils Determined by Laboratory Tests*. OYO Tec. Rep. 3, pp13-37

Vucetic M. & Dobry R. (1991) *Effect of soil plasticità on cyclic response*, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.117, N.1