

Valutazione dell'affidabilità delle prove SPT per la caratterizzazione sismica dei terreni

Massimo Pietrantoni,* Andrea Tagliaferri,** Marco Petrangeli***

Sommario

Il presente articolo riassume gran parte dei risultati delle indagini eseguite per la caratterizzazione sismica dei terreni nell'ambito delle verifiche di vulnerabilità sismica di ponti e viadotti della rete stradale ANAS di alcune Regioni del Sud e Nord Italia, interessate da una sismicità media o elevata. Sono stati analizzati i risultati delle prove SPT mettendoli a confronto con i corrispondenti valori delle velocità delle onde di taglio misurati con prove down-hole.

I numerosi dati disponibili, suddivisi per classi granulometriche e condizioni geologiche, ed elaborati con varie tecniche di analisi statistica, hanno evidenziato la scarsa efficacia delle correlazioni disponibili in letteratura tra le grandezze N_{SPT} e V_s .

Le prove e le elaborazioni effettuate hanno altresì confermato la scarsa attitudine della prova SPT a rappresentare i meccanismi che regolano la trasmissione di onde di taglio nei terreni, ribadendo la necessità di una misura diretta delle velocità delle onde di taglio per la definizione della risposta sismica locale del sito.

La normativa sismica italiana e i metodi di indagine

L'adozione delle nuove norme sismiche, prima con l'O.P.C.M. 3274 del 20/3/2003 e poi con il D.M. 14/1/2008, ha introdotto non pochi cambiamenti nel panorama dell'Ingegneria italiana, soprattutto per ciò che riguarda la risposta sismica locale e l'interazione tra struttura e terreno. Infatti, se sul fronte della progettazione strutturale, già prima dell'introduzione delle nuove norme, si era iniziato un percorso che gradualmente aveva portato all'adozione dei criteri individuati dagli Eurocodici, con i relativi concetti degli Stati Limite, nel campo della risposta sismica dei terreni si era rimasti fermi ad approcci molto semplificati e del tutto inadatti ai nuovi criteri di progettazione.

Come è noto, secondo il D.M. 14/1/2008, in assenza di una specifica analisi di sito, la definizione dell'azione sismica di progetto può essere effettuata con un metodo semplificato basato sull'individuazione di categorie di sottosuolo, distinte sulla base della "velocità equivalente delle onde di taglio" $V_{S,30}$, definita dalla nota espressione:

$$V_{S,30} = \frac{30}{\sum_{i=1, N} \frac{h_i}{V_{S,i}}} \quad [\text{m/s}] \quad (1)$$

* Geologo - Ingegnere geotecnico, Integra s.r.l., Roma

** Ingegnere geotecnico, Integra s.r.l., Roma

*** Professore Università degli Studi "G. D'Annunzio", Pescara

che si riferisce alle caratteristiche dei terreni nell'ambito dei primi 30m di sottosuolo.

Nella stessa normativa si dichiara che "la misura diretta della velocità di propagazione delle onde di taglio è fortemente raccomandata". Nei casi in cui tale determinazione non fosse disponibile, si può fare ricorso ad altri mezzi di indagine o parametri, come ad esempio la prova SPT nei terreni a grana grossa e la resistenza non drenata per i terreni coesivi.

Vengono quindi analogamente definite le seguenti grandezze equivalenti per la resistenza penetrometrica dinamica $N_{SPT,30}$ e la resistenza non drenata $c_{u,30}$

$$N_{SPT,30} = \frac{\sum_{i=1, M} h_i}{\sum_{i=1, M} \frac{h_i}{N_{SPT,i}}} \quad (2)$$

$$c_{u,30} = \frac{\sum_{i=1, K} h_i}{\sum_{i=1, K} \frac{h_i}{c_{u,i}}} \quad (3)$$

La determinazione diretta della velocità delle onde di taglio dei terreni è possibile con metodologie geofisiche in foro (*downhole*, *cross-hole*) o attraverso prospezioni geo-sismiche di superficie (rifrazione con doppia energizzazione, tomografia bidimensionale, MASW).

Con il metodo delle prospezioni è necessario dapprima effettuare una ricostruzione indiretta del modello di sottosuolo attraverso le classiche tecni-

che della sismica a rifrazione, e quindi calcolare la velocità delle onde di taglio. In gran parte delle situazioni, tale tecnologia si è mostrata affidabile, consentendo peraltro di estrapolare i dati su aree estese, passando da una definizione di tipo puntuale, su una singola verticale, ad una interpretazione 2D.

La geofisica in foro prevede invece l'esecuzione di una perforazione (generalmente eseguita a carotaggio continuo) che consente quindi l'individuazione del modello litologico di sottosuolo.

Per tale motivo, il metodo della geofisica in foro rappresenta la tecnica di indagine considerata più affidabile. Essa comporta però la necessità di realizzare una perforazione e quindi costituisce il mezzo di indagine più dispendioso oltre che invasivo.

Per le opere di una certa importanza e per le zone a media o elevata sismicità, la pratica progettuale recente e gli indirizzi forniti dai Committenti o dagli Enti Appaltanti tendono a prevedere una caratterizzazione sismica specifica dei siti, con una misura diretta dei parametri di velocità.

Per contro, per evitare una applicazione rigida delle norme a tutte le costruzioni, indipendentemente dalla loro importanza e dal grado di sismicità, si è rinforzata l'esigenza di sperimentare correlazioni con altre grandezze, più facilmente misurabili ed applicabili ad esempio in siti e/o progetti di importanza minore, nell'ambito di studi di zonazione sismica di aree vaste e/o di opere lineari, laddove risulti particolarmente invasivo e/o non giustificabile in termini di costi/benefici una determinazione diretta estensiva e puntuale delle velocità delle onde di taglio.

Le correlazioni esistenti in letteratura

Tra le varie correlazioni disponibili in letteratura, quelle relative alle prove SPT rappresentano le più diffuse. I primi studi di correlazione si sono sviluppati principalmente negli Stati Uniti e in Giappone fin dagli anni '70. Una sintesi di questi studi è riportata nella tabella I.

Tab. I – Principali correlazioni tra V_s and N_{SPT} (da BRANDENBERG *et al.*, 2010).

Tab. I – Some existing correlations presenting V_s as a function of N_{SPT} . (from BRANDENBERG *et al.*, 2010).

Author(s)	I.D.	All soils	Sand	Silt	Clay
Shibata (1970)	A	-	$V_s = 31.7 N^{0.54}$	-	-
Ohba and Toriuma (1970)	B	$V_s = 84 N^{0.31}$	-	-	-
Imai and Yoshimura (1975)	C	$V_s = 76 N^{0.33}$	-	-	-
Ohta et al (1972)	D	-	$V_s = 87.2 N^{0.36}$	-	-
Fujiwara (1972)	E	$V_s = 92.1 N^{0.337}$	-	-	-
Ohsaki and Iwasaki (1973)	F	$V_s = 81.4 N^{0.39}$	-	-	-
Imai et al (1975)	G	$V_s = 89.9 N^{0.341}$	-	-	-
Imai(1977)	H	$V_s = 91 N^{0.337}$	$V_s = 80.6 N^{0.331}$	-	$V_s = 80.2 N^{0.292}$
Ohta and Goto (1978)	I	$V_s = 85.35 N^{0.348}$	-	-	-
Seed and Idriss (1981)	J	$V_s = 61.4 N^{0.5}$	-	-	-
Imai and Tonouchi (1982)	K	$V_s = 96.9 N^{0.314}$	-	-	-
Sykora and Stokoe (1983)	L	-	$V_s = 100.5 N^{0.29}$	-	-
Jinan (1987)	M	$V_s = 116.1 (N+0.3185)^{0.202}$	-	-	-
Okamoto et al (1989)	N	-	$V_s = 125 N^{0.3}$	-	-
Lee (1990)	O	-	$V_s = 57.4 N^{0.49}$	$V_s = 105.64 N^{0.32}$	$V_s = 114.43 N^{0.31}$
Athanasopoulos (1995)	P	$V_s = 107.6 N^{0.36}$	-	-	$V_s = 76.55 N^{0.445}$
Sisman (1995)	Q	$V_s = 32.8 N^{0.51}$	-	-	-
Iyisan (1996)	R	$V_s = 51.5 N^{0.516}$	-	-	-
Kanai (1966)	S	$V_s = 19 N^{0.6}$	-	-	-
Jafari et al (1997)	T	$V_s = 22 N^{0.85}$	-	-	-
Kiku et al (2001)	U	$V_s = 68.3 N^{0.292}$	-	-	-
Jafari et al (2002)	V	-	-	$V_s = 22 N^{0.77}$	$V_s = 27 N^{0.73}$
Hasancebi and Ulusay (2006)	W	$V_s = 90 N^{0.309}$	$V_s = 90.82 N^{0.319}$	-	$V_s = 97.89 N^{0.269}$
Ulugergerli and Uyanik (2007)	X	${}^a V_{SU} = 23.291 \ln(N)+405.61$	-	-	-
Ulugergerli and Uyanik (2007)	Y	${}^b V_{SL} = 52.9 e^{-0.011N}$	-	-	-
Dikmen (2009)	Z	$V_s = 58 N^{0.39}$	$V_s = 73 N^{0.33}$	$V_s = 60 N^{0.36}$	$V_s = 44 N^{0.48}$
Pitilakis et al. (1999)	AA	-	$V_s = 145(N_{60})^{0.178}$	-	$V_s = 132(N_{60})^{0.271}$
Hasancebi and Ulusay (2006)	AB	$V_s = 104.79(N_{60})^{0.26}$	$V_s = 131(N_{60})^{0.205}$	-	$V_s = 107.63(N_{60})^{0.237}$

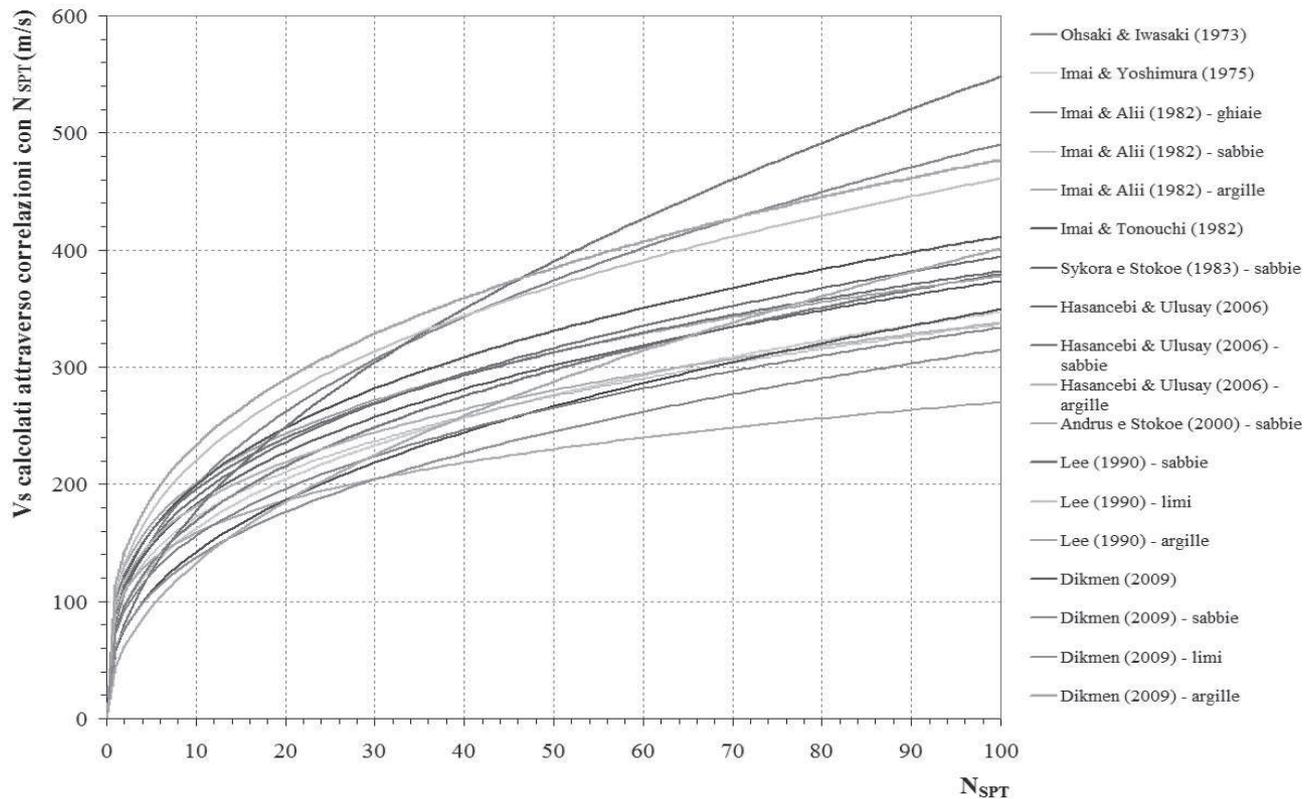


Fig. 1 – Principali correlazioni N_{SPT} - V_s di letteratura.

Fig. 1 – Comparison of estimated shear wave velocity from various SPT correlations.

Tra i primi risultati si citano quelli presentati da [OHSAKI *et al.*, 1973] relativi a 200 campioni di terreni sabbiosi poco coesivi di circa 200 siti giapponesi.

Successivamente [OHTA *et al.*, 1978] hanno formulato 15 correlazioni differenziate per tipo di terreno, età del deposito e profondità.

[SYKORA *et al.*, 1983] hanno evidenziato che il tipo di terreno e l’età del deposito non sono significativi per la stima di V_s essendo molto più importante la correttezza del valore di N_{SPT} .

Gli studi condotti da [PIRATHEEPAN *et al.*, 2002] su terreni olocenici in California, Taiwan, Giappone e Canada, hanno evidenziato differenze sostanziali con i risultati di [OHTA *et al.*, 1978] per le sabbie fini e risultati analoghi con quelli di [ANDRUS *et al.*, 2000].

[JAFARI *et al.*, 2002] hanno presentato una dettagliata revisione storica delle correlazioni statistiche tra N_{SPT} e V_s .

Complessivamente, sono state pubblicate oltre 50 correlazioni tra la resistenza penetrometrica SPT e la velocità di propagazione delle onde di taglio.

Dall’analisi dei singoli lavori si evince quasi sempre una elevata dispersione dei risultati. Le curve di correlazione proposte in questi studi (Fig. 1) presentano differenze apprezzabili.

Tale variabilità è dovuta anche ai diversi metodi di selezione dei risultati (per granulometrie, per età del deposito, ecc.), alle diverse correzioni adottate

(per profondità, energia del maglio) e al tipo di analisi statistica adottata.

Le più comuni correlazioni proposte in letteratura hanno una forma del tipo $V_s = A \cdot N^B$, dove le costanti A e B sono determinate con regressioni statistiche a partire da un set di dati. I valori di resistenza penetrometrica sono generalmente non corretti con la profondità (N_{SPT}), ma vengono anche utilizzati i valori corretti sulla base dell’energia del maglio, lunghezza delle aste, tipo di campionatore e in questo caso il valore di N_{SPT} viene sostituito dal valore N_{60} .

Nonostante, sia impossibile per le correlazioni che non tengono conto di questa correzione, stabilire se un errore sistematico sia stato introdotto dall’efficienza del maglio, dall’uso di campionatori non standard, ecc..., si comprende perché tale correzione, nella maggior parte dei casi, non venga adottata: è improbabile infatti che la raccolta dei dati, spesso da siti di indagine diversi, possa avvenire con un rigoroso controllo della correttezza delle procedure e delle effettive attrezzature e modalità di prova adottate, vanificando quindi l’applicazione delle suddette correzioni.

Una ulteriore difficoltà nell’ottenere una correlazione valida è dovuta ai diversi metodi di acquisizione delle velocità delle onde di taglio in sito (down-hole, cross-hole, sismica a rifrazione, MASW) che notoriamente forniscono risultati anche significativamente diversi.

Un problema degno di nota è quello relativo alla normalizzazione delle grandezze V_s e N_{SPT} rispetto alla tensione litostatica.

È noto che V_s e N_{SPT} sono normalizzati in maniera differente rispetto alla tensione litostatica così che sembra ingiustificato che gran parte delle correlazioni utilizzino V_s e N_{60} invece di V_{s1} e $(N_1)_{60}$.

Le espressioni seguenti sono generalmente utilizzate per la normalizzazione di V_s e N_{60} .

$$V_{s1} = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v} \right)^m \cdot V_s \quad (4)$$

$$(N_1)_{60} = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v} \right)^n \cdot N_{60} \quad (5)$$

Valori tipici di n sono 0.5 per sabbie e 1 per argille, mentre m varia tra 0.25 e 0.5 rispettivamente per gli stessi terreni; il tipico rapporto è quindi $n/m = 2$ [YAMADA *et al.*, 2008].

I differenti criteri di normalizzazione di V_s e N_{60} rispetto σ'_v dovrebbero introdurre un errore sistematico nelle relazioni tra V_s e N_{60} . Un esempio di questo concetto è riportato in [BRANDENBERG *et al.*, 2010], dove si illustra il profilo per una sabbia uniforme pulita con $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, $(N_1)_{60} = 20$ e livello di falda profonda con i valori di V_s ricavati dalla relazione [ANDRUS *et al.*, 2004], $V_{s1} = 87.8 \cdot (N_1)_{60}^{0.253} = 187 \text{ m/s}$. Sostituendo la (4) e la (5) nella relazione precedente si ottiene:

$$V_s = 87.8 \cdot N_{60}^{0.253} \cdot \left(\frac{P_a}{\sigma'_v} \right)^{0.253n-m} \quad (6)$$

Si noti che V_s dipende sia da N_{60} che da σ'_v poiché nella relazione di [ANDRUS *et al.*, 2004] vengono utilizzati $(N_1)_{60}$ e V_{s1} . Assumendo $n=0.5$ e $m=0.25$ i conseguenti profili di N_{60} and V_s sono riportati nella figura 2. La figura 2 mostra anche il *bias* introdotto dal non considerare l'influenza della tensione litostatica: un profilo usa infatti il valore $0.253n-m=0.124$, mentre l'altro, ignorando la correzione della tensione litostatica, ha un valore di $0.253n-m=0$. I due metodi forniscono la stessa stima di V_s quando $\sigma'_v = P_a$ (cioè a 5m di profondità), ma divergono significativamente a profondità minori e maggiori. L'unico metodo razionale per eliminare questo errore sarebbe quello di correlare V_{s1} con $(N_1)_{60}$ utilizzando i corretti fattori di normalizzazione.

Gli esponenti n and m sono costanti empiriche che dipendono dal tipo di terreno, indice di plasticità e cementazione [BRANDENBERG *et al.*, 2010]. È quindi oggettivamente difficile correggere accuratamente N_{60} e V_s per ottenere $(N_1)_{60}$ and V_{s1} in modo da giungere ad una relazione che non sia affetta da errori sistematici. A meno che non sia possibile arrivare a valutazioni specifiche e corrette di questi fattori, è preferibile introdurre un termine relativo alla σ'_v nella relazione tra V_s e N_{60} per definire intrinse-

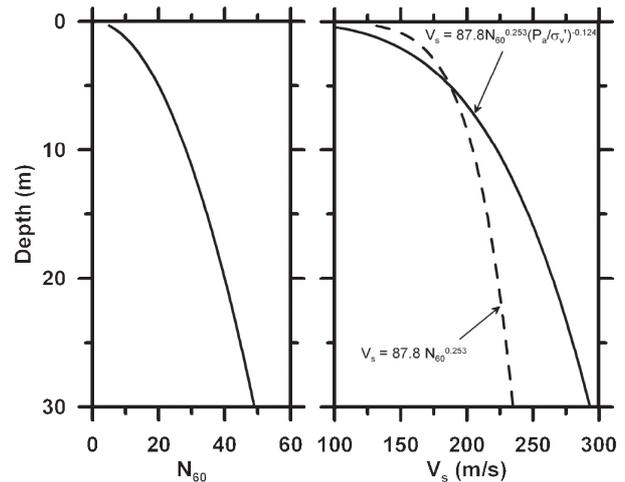


Fig. 2 – Influenza della tensione litostatica sui valori di V_s da [BRANDENBERG *et al.*, 2010].

Fig. 2 – Example of influence of overburden scaling on relation between V_s and N_{60} . from [BRANDENBERG *et al.*, 2010].

camente il rapporto fra n e m per un particolare set di dati.

Nel presente studio, come si vedrà oltre, l'effetto della tensione litostatica è stato considerato utilizzando una tecnica di analisi di regressione multipla introducendo una seconda variabile rappresentata dalla profondità.

Inquadramento geologico dei siti di indagine

I dati presentati in questo articolo si riferiscono alle indagini di caratterizzazione sismica svolte nell'ambito delle verifiche di vulnerabilità sismica di ponti e viadotti della rete stradale ANAS. In particolare lo studio ha riguardato alcune Regioni del Sud e Nord Italia, interessate da una sismicità media o elevata: Sicilia, Calabria, Basilicata, Puglia, Marche, Toscana, Friuli. Le infrastrutture sottoposte a verifica fanno parte di alcune delle più importanti reti viarie nazionali e sono illustrate graficamente nelle figure 3 e 4.

Sono stati sottoposti a verifica circa 250 tra ponti e viadotti, tutti di lunghezza complessiva superiore al centinaio di metri, che abbracciano un'ampia casistica di tipologie strutturali (dai viadotti in muratura a quelli in c.a.p. a quelli in acciaio; da schemi strutturali ad arco, alle travi poggiate o continue) e di periodi di costruzione (dagli anni '30 ai periodi più recenti).

Complessivamente sono state analizzate 116 verticali di indagine, tutte costituite da un foro di sondaggio a carotaggio profondo 30m con prove SPT, analisi di laboratorio su campioni e prova down-hole. In totale sono state eseguite 354 prove SPT, di cui 237 associate a prove down-hole in foro, 117 associate ad altre prove (sismica a rifrazione, MASW, tromi-



Fig. 3, 4 – Localizzazione delle reti viarie oggetto delle indagini.

Fig. 3, 4 – Location map of the road infrastructures.

no). Di seguito saranno analizzati soltanto i dati relativi al primo dei due gruppi, ossia i valori di N_{SPT} associati direttamente a misure di V_S da down-hole.

Le prove hanno riguardato siti e regioni molto distanti tra loro, caratterizzati da contesti geologici molto diversi anche nell’ambito degli stessi lotti. La distinzione delle diverse condizioni geologiche e anche geomorfologiche locali ha consentito l’analisi e la trattazione separata dei dati secondo i criteri che verranno chiariti nel seguito.

In **Sicilia** i principali assi stradali indagati interessano le zone interne della regione, dove il substrato geologico è costituito prevalentemente dalle formazioni argilloso-sabbiose e arenacee dei bacini sedimentari pliocenici e mio-oligocenici (gruppo gessoso-solfifero e Numidico); nel Ragusano e Siracusano il substrato è invece costituito dalle formazioni mioceniche calcaree e calcareo-marnose.

In **Calabria** sono stati investigati contesti geologici molto diversi: sulla Jonica si attraversano le parti terminali delle grandi “fiumare” con spessori alluvionali di oltre 30 m; i viadotti della Jonio-Tirreno, lungo la fiumara del Torbido, interessano potenti accumuli alluvionali che ricoprono le formazioni metamorfiche e intrusive del massiccio calabro.

In **Basilicata** il Raccordo Sicignano Scalo-Potenza (Basentana) attraversa i rilievi costituiti dalle rocce calcaree della piattaforma mesozoica, alle quali si sovrappongono i flysch cenozoici dei bacini interni e varie tipologie di coperture quaternarie, da alluvionali a fluvio-lacustri.

In **Puglia** i tre assi stradali principali indagati interessano tutta la successione del bacino sedimentario della Daunia, dalle formazioni flyschoidi cretache alle argille marnose mioceniche e quindi i depositi argilloso-sabbiosi plio-pleistocenici dell’Unità della Fossa Bradanica.

Nelle **Marche** l’asse della S.S.16 Adriatica attraversa le aree pericostiere con i relativi i depositi quaternari alluvionali-marini e nelle zone più interne i depositi marini plio-pleistocenici di “avanfossa”. Gli assi trasversali tagliano invece tutta la successione della serie marchigiana, dalle formazioni calcaree di piattaforma ai depositi arenaceo-marnosi sin-orogonici fino ai depositi pelitici di avanfossa, interessando ovviamente tutte le coperture detritico-alluvionali quaternarie.

In **Toscana** sono stati interessati i depositi costieri con l’Aurelia ed i depositi pelitici pliocenici e con gli altri assi stradali il bacino senese e i flysch torbiditici marnoso-arenacei del Miocene.

I viadotti del **Friuli** interessano i depositi alluvionali di fondovalle sovrapposti alle rocce del substrato dolomitico triassico e alle arenarie del Carbonifero.

Criteri di interpretazione

Il principale obiettivo che ci si è prefissati è stato quello di una selezione dei dati con vari criteri (regionali, geologici, granulometrici) per tentare di ridurre la dispersione.

In quasi tutti gli studi di letteratura vengono distinti i dati con criteri granulometrici, diversi a secondo degli Autori. Questa distinzione è stata applicata anche nel presente studio distinguendo quattro classi granulometriche:

- 1) ghiaie e sabbie con abbondante ghiaia (gruppo G della classifica USCS);
- 2) sabbie con scarsa percentuale di ghiaia (gruppo S della classifica USCS ad eccezione di SC);
- 3) limi e limi sabbiosi, dal comportamento intermedio (gruppo M e SC della classifica USCS);
- 4) limi argillosi e argille limose dal comportamento coesivo (gruppo C della classifica USCS).

Una ulteriore distinzione che si trova in alcuni studi (ad esempio OHTA *et al.*, 1978) viene effettuata sulla base dell'età del deposito (Olocene e Pleistocene nel caso citato). Questa distinzione, se non motivata, potrebbe sembrare pleonastica, ma in realtà può rivestire importanza in particolari contesti geologici. In questo lavoro è stata fatta una distinzione tra depositi di copertura (detritico-alluvionale) e le formazioni del substrato geologico che, a seconda dei siti e delle regioni, abbracciano formazioni di varia età e natura. Tuttavia, poiché gran parte delle formazioni del substrato geologico sono costituite da materiali lapidei o semi-lapidei (in corrispondenza delle quali le prove SPT hanno fornito valore a rifiuto o molto elevato), nella categoria delle formazioni del substrato sono stati inseriti solo i terreni limo-argillosi delle formazioni marine plio-pleistoceniche. Si tratta di formazioni che, sia pur in contesti regionali diversi, sono molto diffuse in tutto il territorio nazionale costituendo larghi settori collinari della fascia peri-costiera adriatica, ma che si rinvergono anche nelle zone interne appenniniche, sede dei vecchi bacini sedimentari marini della Toscana, ma anche della Puglia, Basilicata e Sicilia. La distinzione di queste formazioni dagli analoghi (dal punto di vista granulometrico) terreni di copertura è indispensabile poiché si tratta di materiali sovraconsolidati e in parte diagenizzati (argille marnose).

In analogia con altri lavori [DEJONG, 2007] non è stata effettuata la normalizzazione secondo l'energia e l'efficienza del dispositivo di battitura.

Risultati delle prove

Nei grafici che seguono sono riportati i valori di N_{SPT} in funzione delle V_S misurate nell'intervallo di profondità corrispondente alla prova penetrometrica. I valori di V_S sono stati ricavati con la prova down-hole realizzata con una coppia di ricevitori (metodo "true time interval").

Questi grafici sono stati riportati:

- per l'intera nuvola di risultati (237 coppie N_{SPT} - V_S) distinti per Regioni;
- distinti nelle quattro categorie di terreni prima descritte.

Nei grafici sono stati riportati anche i valori di N_{SPT} a rifiuto, con un valore convenzionale pari a 100, ma questi valori non sono stati considerati per il calcolo delle curve di regressione in quanto il valore pari a 100 è in effetti solo un valore convenzionale (come è noto la prova si interrompe al valore di colpi pari a 100 quando non si raggiunge la penetrazione di 30cm).

Da questi dati sono state ricavate correlazioni lineari del tipo:

$$V_S = \alpha + \beta_1 \cdot N_{SPT} \quad (7)$$

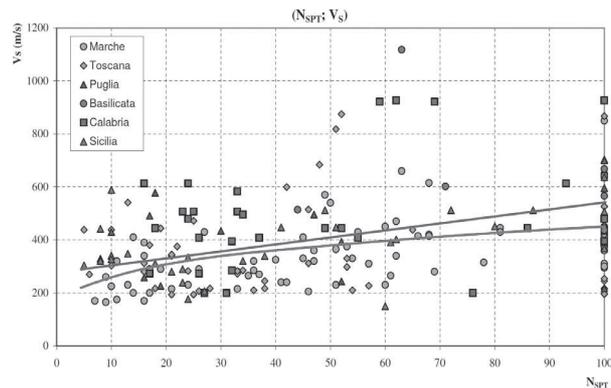
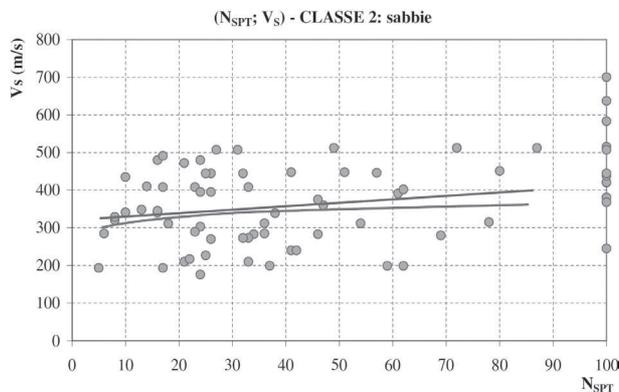
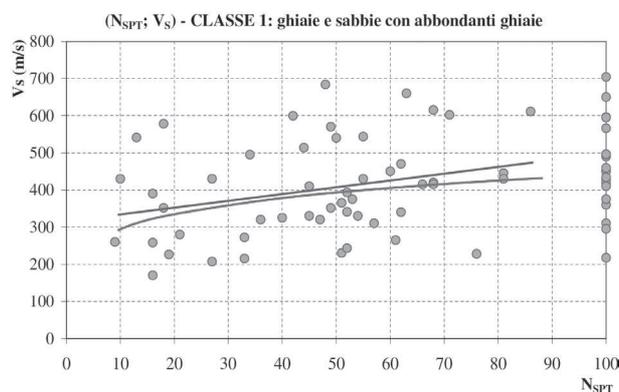


Fig. 5 – Coppie di valori (N_{SPT} - V_S) per l'intera nuvola di dati disponibili.

Fig. 5 – Plot of N_{SPT} vs. V_S - All available data set.



Figg. 6-7 – Coppie di valori (N_{SPT} - V_S) – Classi granulometriche 1 e 2.

Figg. 6-7 – Plot of N_{SPT} -vs. V_S – Granulometric groups 1 and 2.

e relazioni esponenziali del tipo:

$$V_S = A \cdot N_{SPT}^B \quad (8)$$

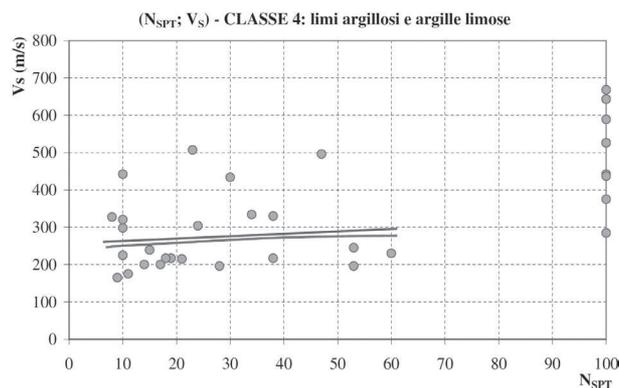
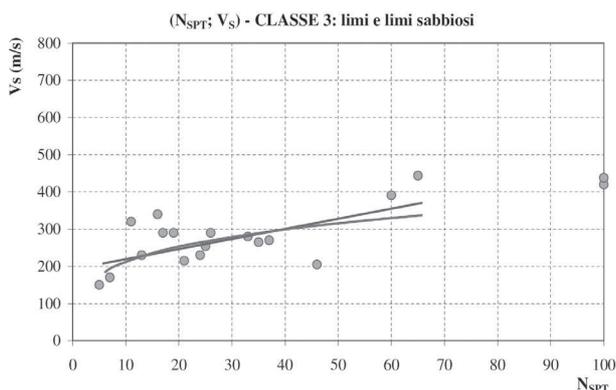
I coefficienti delle varie relazioni sono riportati nella tabella seguente.

Il grado di correlazione per entrambe le tipologie di relazioni risulta evidentemente molto basso e del tutto inadatto a poter rappresentare una possibile relazione tra questi parametri. Non è stato ri-

Tab. II – Correlazioni di tipo lineare.

Tab. II – Linear relationships.

CLASSE GRANULOMETRICA	CORRELAZIONI LINEARI			CORRELAZIONI ESPONENZIALI		
	α	β_1	R^2	A	B	R^2
Dati indifferenziati	263.60	2.878	0.15	158.97	0.224	0.15
1) ghiaie e sabbie con abbondanti ghiaia	306.97	2.011	0.09	195.01	0.179	0.09
2) sabbie con ridotta percentuale di ghiaie	319.54	0.925	0.03	267.67	0.068	0.02
3) limi e limi sabbiosi	198.09	2.753	0.40	121.17	0.251	0.41
4) limi argillosi e argille limose	267.16	0.530	0.01	222.95	0.058	0.01

Figg. 8-9 – Coppie di valori (N_{SPT} - V_s) – Classi granulometriche 3 e 4.Figg. 8-9 – Plot of N_{SPT} -vs. V_s – Granulometric groups 3 and 4.

portato il grafico delle prove eseguite nelle argille del substrato; una volta esclusi i valori a rifiuto i dati diventano molto scarsi e i risultati poco rappresentativi.

Non si evidenzia un sostanziale miglioramento utilizzando correlazioni di tipo esponenziale; i valori di R^2 , infatti, risultano sempre dello stesso ordine di grandezza della correlazione lineare.

Si è proceduto pertanto ad un trattamento dei dati con i criteri illustrati nel seguito.

Classi di suolo secondo il D.M. 14/1/2008

La Normativa Italiana consente di definire la classe di suolo attraverso i valori di N_{SPT} e di c_u .

Si ricorda che l’uso delle prove SPT per la stima delle categorie di suolo sarebbe previsto in normativa solo per i terreni granulari. È inoltre noto che le prove SPT, all’inizio utilizzate per la sola stima dell’angolo di attrito di sabbie, hanno poi trovato una sempre più diffusa, e forse esagerata, applicazione in svariati settori (correlazioni con resistenza a taglio non drenata, modulo di deformabilità, se non addirittura portanza del terreno, adesione laterale, ecc..) e nella più ampia gamma di terreni. Le correlazioni applicate su terreni diversi da quelli tipicamente sabbiosi sono sconsigliabili e comunque da prendere con estrema cautela.

Non si può negare però che questo tipo di prova sia entrato ormai negli standard delle indagini geognostiche e anche i non addetti ai lavori ne fanno un uso estensivo che, proprio per i motivi suddetti, dovrebbe essere adeguatamente controllato e verificato.

Si evidenzia inoltre che le correlazioni N_{SPT} - V_s per terreni argillosi o genericamente a grana fine sono presentate in numerosi lavori disponibili in letteratura (vedi Tab. 1) e nei testi di settore.

Per questi motivi, nel presente lavoro si è deciso di analizzare anche i dati relativi ai terreni a grana fina, con le accortezze e le considerazioni prima riportate.

Con tale impostazione si è provveduto quindi a confrontare i risultati ottenuti con la misura diretta delle V_s con la classificazione basata sulle prove SPT. Per fare ciò è stata costruita una tabella a doppia entrata (Tab.III) all’interno della quale viene riportato il campo di variazione di N_{SPT} (intervalli 0÷14, 15÷49, 50÷99 e rifiuto) in funzione dei corrispondenti campi di variazione delle V_s previsti dalla normativa (intervalli 0÷179, 180÷359, 360÷800 e >800 m/s). Sono state inserite quindi tutte le coppie di valori (N_{SPT} , V_s) a disposizione, con i valori a rifiuto separati dagli altri. Lungo la diagonale sono evidenziati i numeri di coppie ricadenti negli intervalli indicati dalla normativa; in basso (in grassetto) il numero totale di valori per ogni singolo campo di N_{SPT} e in grassetto corsivo a destra i valori rela-

Tab. III – Tabella a doppia entrata delle frequenze delle coppie di N_{SPT} - V_S .

Tab. III – Frequency of N_{SPT} - V_S range values.

V_S (m/s)	Classe	N_{SPT}				Totali
		0÷14	15÷49	50÷99	Rifiuto	
0÷179	D	4 (17%)	2	0	1	6
180÷359	C	14	53 (56%)	17	6	90
360÷800	B	5	36	36 (65%)	52 (81%)	129
>800	A	0	4	2	6 (9%)	12
Totali		23	95	55	64	237

tivi al numero di coppie ricadenti nei singoli intervalli di V_S .

Dalla tabella si ricava che soltanto in 4 casi su 23 (ovvero nel 17% dei casi) i valori di N_{SPT} misurati riescono ad individuare correttamente la categoria D (valori di V_S compresi nell'intervallo 0-180 m/s), mentre in 19 casi su 23 (83%) ai valori di N_{SPT} ricadenti nel range 0÷14 sono corrisposti valori di V_S superiori a 180 m/s (quindi in categoria C o B).

In corrispondenza del secondo intervallo di N_{SPT} (15÷49) si ha una migliore rispondenza con la classificazione: in 53 casi su 95 (56%) è confermata la categoria C, con valori di V_S compresi nell'intervallo 180-359 m/s, anche se in 36 casi (38%) le prove down hole indicano una categoria B.

Per quanto riguarda i valori di N_{SPT} compresi fra 50 e 99 si ottiene una percentuale del 65% (36 casi su 55) in cui i corrispondenti valori di V_S sono risultati appartenenti all'intervallo 360÷800 m/s (categoria B). La percentuale aumenta considerando che nell'81% dei casi i valori SPT a rifiuto le prove down hole hanno poi indicato una categoria B. Considerando complessivamente i valori di N_{SPT} superiori a

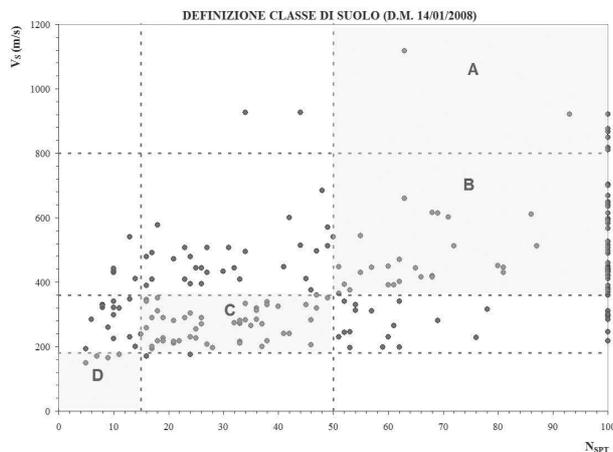


Fig. 10 – Definizione classe di suolo ai sensi del D.M. 14/01/2008. Dati indifferenziati.

Fig. 10 – Seismic soil classification according to the Italian Norm D.M. 14/01/2008. All soils.

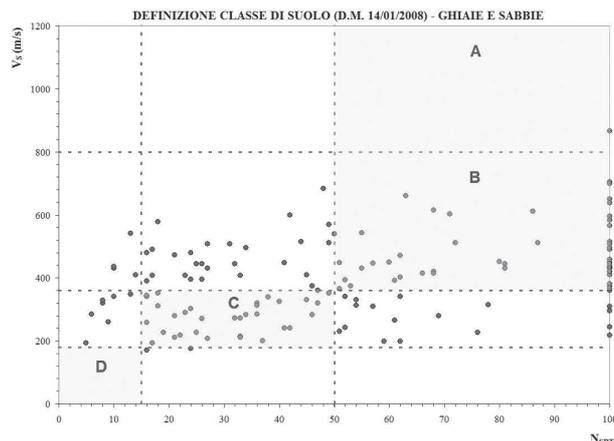


Fig. 11 – Definizione classe di suolo ai sensi del D.M. 14/01/2008 - Terreni granulari.

Fig. 11 – Seismic soil classification according to the Italian Norm D.M. 14/01/2008. Granular soils.

50 (quindi anche i valori a rifiuto), nel 74% dei casi corrisponde una categoria B.

In conclusione, dalla tabella III e dalle successive figure 10÷12 si ricavano le seguenti principali indicazioni:

- i valori di N_{SPT} tendono ad una generale sottostima della categoria di sottosuolo;
- la sottostima è particolarmente evidente per i valori di N_{SPT} molto bassi (<15), per i quali solo nel 17% dei casi si ottiene una corretta classificazione;
- la migliore rispondenza si ottiene per i valori di N_{SPT} >50 per i quali, considerando anche i valori a rifiuto, si ottiene una corretta classificazione nel 74% dei casi.

Tale situazione appare ancora più evidente se i risultati ottenuti vengono posti in forma grafica.

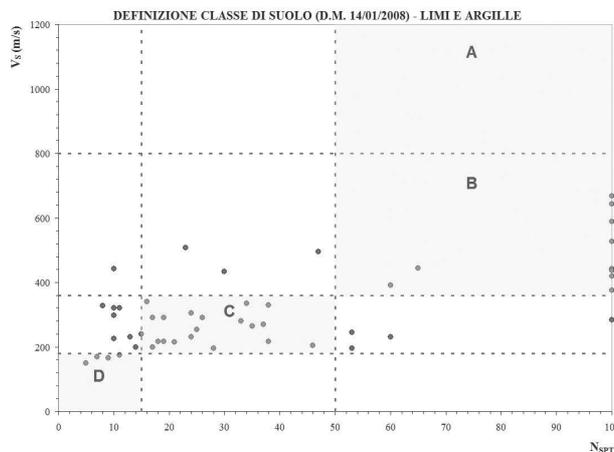


Fig. 12 – Definizione classe di suolo ai sensi del D.M. 14/01/2008 – Terreni coesivi.

Fig. 12 – Seismic soil classification according to the Italian Norm D.M. 14/01/2008. Cohesive soils.

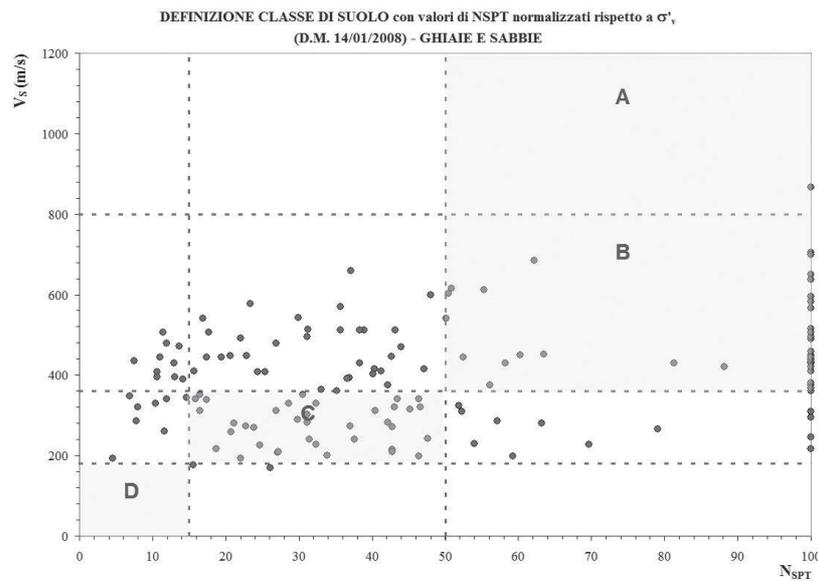


Fig. 13 – Definizione classe di suolo ai sensi del D.M. 14/01/2008 con valori di N_{SPT} normalizzati rispetto a σ'_v - Terreni granulari.

Fig. 13 – Seismic soil classification according to the Italian Norm (D.M. 14/01/2008) using stress-normalized values. Granular soils.

Suddividendo i dati nelle due categorie di terreni granulari (ghiaie e sabbie) e quelli intermedi e coesivi (limi e argille) si ottengono risultati del tutto analoghi; anzi sembrerebbe che per terreni a grana fine la determinazione della classe di suolo in funzione del valore N_{SPT} sia maggiormente efficace, soprattutto per la categoria C.

La forte dispersione dei dati e la scarsa applicabilità delle classificazioni potrebbero essere attribuiti ad uno o più di questi fattori:

- difetti nella esecuzione della prova SPT dovuti ad erronee modalità di prova e/o insiti nella rudimentalità della prova stessa (è stato dimostrato

che gli errori nella determinazione delle V_s con prova down-hole sono poco significative rispetto agli errori che si possono commettere con le prove SPT);

- comportamento atipico dei terreni nei confronti della prova di penetrazione dinamica SPT;
- effetto delle tensioni litostatiche.

Per affinare la ricerca si è proceduto a normalizzare i valori di N_{SPT} rispetto alla tensione litostatica σ'_v . Tuttavia, come è evidente dalle figure che seguono, questa correzione del valore di N_{SPT} non ha particolare efficacia nella definizione della classe di terreno rispetto a quanto già fatto e mostrato nelle figure 11 e 12.

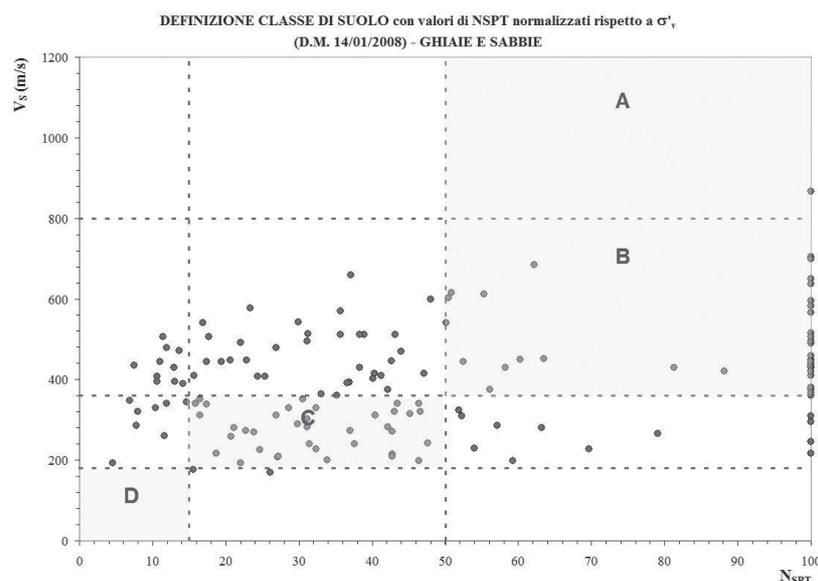


Fig. 14 – Definizione classe di suolo ai sensi del D.M. 14/01/2008 con valori di N_{SPT} normalizzati rispetto a σ'_v - Terreni coesivi.

Fig. 14 – Seismic soil classification according to the Italian Norm (D.M. 14/01/2008) using stress-normalized values. Cohesive soils.

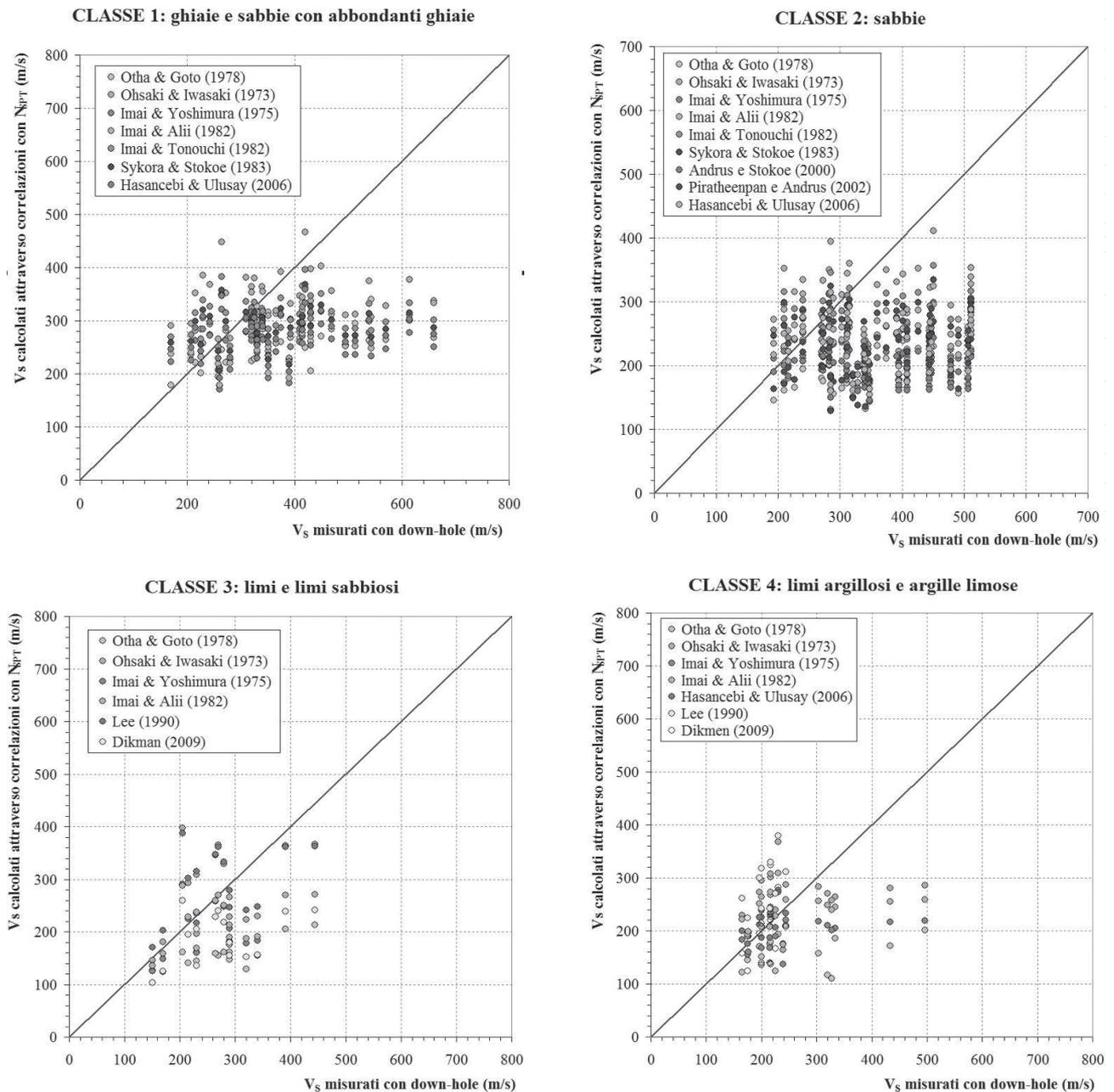


Fig. 15, 16, 17, 18 – Confronto correlazioni di letteratura con misure dirette di V_s .

Figg. 15, 16, 17, 18 – Comparison between existing correlations from literature and measured V_s values.

Analisi statistica dei dati

Per minimizzare alcune delle possibili cause di errore e ridurre la dispersione dei dati, si è proceduto con analisi dei dati stessi separati per geografia (differenti regioni o province geologiche), per condizioni geologiche (formazioni geologiche analoghe o condizioni geomorfologiche simili) e tipo di terreni (depositi alluvionali di fondovalle o terrazzati, coltri detritiche di versante).

Dato che anche con questi accorgimenti non si sono ottenuti risultati particolarmente soddisfacenti si è proceduto con una ulteriore manipolazione dei dati sulla base dei seguenti criteri.

- In accordo con le scelte di molti Autori sono stati scartati valori di N_{SPT} molto bassi o molto alti; tale selezione è stata adottata ad esempio da [OHTA *et al.*, 1978] (che considerano valori $2 < N_{SPT} < 50$) oppure da Brandenburg (che esclude valori di $N_{60} < 3$). Valori molto bassi è noto che conducono a sottostime di V_s e quando questi valori si riducono a pochi colpi/piede, sono sintomo di terreni sensibili o collassabili (se non legati a procedure non corrette, a difetti di pulitura del fondo foro o a reflimento di terreno per acqua in pressione); in questi casi è pratica comune non dare un significato quantitativo al valore di N_{SPT} ottenuto. Parimenti i valori molto elevati posso-

Tab. IV – Risultati analisi di regressione lineare.

Tab. IV – Results of linear regression analysis .

CLASSE GRANULOMETRICA	REGRESSIONE LINEARE SEMPLICE				REGRESSIONE LINEARE MULTIPLA			
	α	β_1	β_2	R^2	α	β_1	β_2	R^2
1) ghiaie e sabbie con abbondanti ghiaie	216.72	3.462	-	0.25	199.47	2.188	10.623	0.35
2) sabbie con ridotta percentuale di ghiaie	314.58	1.386	-	0.08	276.94	0.744	5.953	0.27
3) limi e limi sabbiosi	199.06	2.747	-	0.41	146.43	2.408	11.882	0.52
4) limi argillosi e argille limose	212.83	1.789	-	0.09	223.14	2.042	-2.757	0.10

Tab. V – Risultati analisi di regressione lineare multipla per i dati suddivisi per lotti.

Tab. V – Results of multiple linear regression analysis. Data classified by regions.

CLASSE GRANULOMETRICA	MARCHE				TOSCANA				SICILIA-CALABRIA			
	α	β_1	β_2	R^2	α	β_1	β_2	R^2	α	β_1	β_2	R^2
1) ghiaie e sabbie con abbondanti ghiaie	236.62	1.851	8.901	0.26	-	-	-	-	114.69	0.952	22.828	0.66
2) sabbie con ridotta percentuale di ghiaie	347.27	-1.826	5.810	0.20	150.26	0.431	22.330	0.54	257.44	0.952	6.495	0.25
3) limi e limi sabbiosi	251.87	-0.175	3.617	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-
4) limi argillosi e argille limose	181.68	0.777	0.777	0.36	232.31	-6.889	37.308	0.63	378.77	2.237	11.690	0.18

no essere causati da eterogeneità dei materiali (ad esempio la presenza di uno o pochi elementi lapidei immersi in materiali sabbiosi che rendono difficile la penetrazione senza però contribuire ad un aumento della densità relativa e delle caratteristiche meccaniche dei terreni). In questo lavoro si è scelto di scartare i valori di $N_{SPT} < 5$ e di $N_{SPT} > 80$.

- È stata poi effettuata una valutazione, per quanto possibile oggettiva, della affidabilità di alcune prove confrontando i valori ottenuti con le osservazioni di campagna, le stratigrafie, i risultati ottenuti su terreni analoghi nella stessa verticale. Tale valutazione ha come scopo l’individuazione di valori evidentemente anomali che possono essere attribuibili ad errori di misura. Questa “pulitura” di dati, sia pure soggettiva, in alcuni casi è apparsa doverosa e si è deciso di eliminare i dati nei casi più evidentemente anomali adottando come criterio quello di non considerare valide le prove quando i valori di N_{SPT} avrebbero fatto attribuire i terreni ad una classe superiore o inferiore di due categorie rispetto a quanto stabilito dalla normativa italiana. Ad esempio si è deciso di scartare le prove che hanno fornito valori di $N_{SPT} < 15$ (attribuibili quindi alle categorie D) quando i corrispondenti valori di V_s (misurati con down-hole) risultano superiori a 360m/s (attribuibili

li quindi alla categoria B); o viceversa valori di $N_{SPT} > 50$ (attribuibili alle categorie B) quando i corrispondenti valori di V_s risultano inferiori a 180m/s (attribuibili quindi alla categoria D). È evidente che discrepanze di questo tipo sono da attribuire a grossolani errori o a terreni in cui le prove SPT non possono considerarsi rappresentative.

Una volta depurati i valori di N_{SPT} e V_s secondo i criteri suddetti, i dati sono stati utilizzati per la ricerca di una relazione empirica più efficace rispetto a quelle ricavabili dai dati non trattati.

I dati così ottenuti sono prima stati messi a confronto con le più importanti correlazioni esistenti in letteratura (vedi figure 15÷18). Nei grafici sono riportati in ascissa i valori delle velocità di taglio V_s misurati con le prove down-hole, mentre nelle ordinate i valori delle velocità delle onde di taglio determinati attraverso le più importanti correlazioni di letteratura a partire dalle prove SPT.

Tale confronto mostra un’elevata dispersione dei risultati in tutti i casi analizzati e per tutte le classi granulometriche considerate e una scarsa applicabilità delle correlazioni, anche a seguito del trattamento dei dati.

Tali risultati non inficiano ovviamente la validità delle correlazioni proposte in letteratura, tuttavia evidenziano una difficoltà della loro applicazione in maniera incondizionata.

Alla luce di questi risultati si è ritenuta opportuna la ricerca di correlazioni empiriche tra N_{SPT} e V_S specifiche per i dati a disposizione. Per perseguire tale obiettivo sono state condotte analisi statistiche di regressione lineare semplice e multipla in modo da considerare anche altre variabili potenzialmente significative; una di queste risulta la profondità H e quindi la tensione litostatica σ'_v corrispondente. La scelta di utilizzare l'analisi di regressione lineare piuttosto che di tipo non lineare è stata dettata dal fatto che i dati di letteratura disponibili (supportati anche da un confronto a campione effettuato con i dati di questo lavoro) indicano che con un'analisi non lineare il valore dell'indice di correlazione R^2 è confrontabile, se non addirittura inferiore a quello della regressione lineare.

Si specifica che la tecnica di analisi statistica utilizzata per questo lavoro non è rigorosa come quelle adottate in altri studi (ad es. BRANDENBERG *et al.*, 2010); si è preferito seguire una procedura più semplice, facilmente riproducibile anche in campo progettuale.

Analisi di regressione lineare multipla

Dai risultati ottenuti è apparso evidente che la semplice dipendenza di V_S da N_{SPT} , espressa attraverso una relazione del tipo:

$$V_S = \alpha + \beta_1 \cdot N_{SPT} \quad (9)$$

risulta poco affidabile, per cui è stata ricercata una relazione che possa considerare altre variabili che abbiano influenza sui dati analizzati.

È stata quindi utilizzata una relazione del tipo:

$$V_S = \alpha + \beta_1 \cdot N_{SPT} + \beta_2 \cdot H \quad (10)$$

dove le V_S sono espresse in metri/sec e la profondità H , in corrispondenza della quale è stata effettuata la prova SPT, in metri.

Le analisi di regressione lineare semplice e multipla eseguite per le diverse classi granulometriche individuate hanno condotto alla definizione della migliore linea di tendenza con i relativi coefficienti di correlazione riassunti nella tabella che segue.

Un primo risultato che si ricava è l'aumento del coefficiente di correlazione anche per la regressione lineare semplice rispetto alla stessa elaborazione dei dati non trattati riassunti nella tabella 4 (da 0.09 a 0.25 per la classe 1, da 0.03 a 0.08 per la classe 2, da 0.01 a 0.09 per la classe 4; sostanzialmente invariati per la classe 3).

Dal confronto tra le analisi di regressione semplice e multipla si ricava che per i terreni granulari la stima di V_S rimane caratterizzata da coefficienti di correlazione molto bassi, ma in aumento se si

applica la regressione multipla (0.08 e 0.25 nel caso di analisi di regressione lineare semplice; 0.27 e 0.35 nel caso di analisi di regressione multipla). La stima risulta poco significativa per i terreni argillosi con entrambe le analisi (0.09 e 0.10 rispettivamente). Una stima più precisa si riscontra per terreni misti, per i quali i coefficienti di correlazione risultano rispettivamente 0.41 e 0.52.

Il test di Fischer condotto per queste analisi per verificare la condizione di *omoschedasticità*, ha fornito risultati positivi.

Tuttavia, è innegabile che, a parte i risultati per i terreni limoso-sabbiosi, i coefficienti di correlazione ottenuti siano del tutto insoddisfacenti per una corretta e razionale applicazione di queste correlazioni.

Come detto in precedenza, i risultati non migliorano se si procede con una ulteriore selezione di dati su basi geografiche o geologiche, in quanto si notano coefficienti di correlazioni che variano anche di molto tra una condizione e l'altra, ma senza che si possa trovare una spiegazione razionale.

Per ulteriore tentativo sono stati differenziati i dati per lotti di esecuzione (realizzati da imprese e o gruppi di imprese omogenee) per cercare di trovare possibili relazioni condizionate da eventuali difetti o analogie nelle procedure di prove (sostanzialmente delle prove SPT).

Anche in questo caso i risultati sono molto dispersi e non oggettivamente giustificabili. Solo come esempio si citano i diversi coefficienti di correlazioni ottenuti per ghiaie e sabbie ghiaiose nei lotti della Sicilia-Calabria e delle Marche, risultati pari a 0.66 e 0.26 rispettivamente. I risultati complessivi di questo tentativo sono riportati nella tabella V.

Conclusioni

I risultati ottenuti in questo studio indicano, in analogia con altri studi precedenti, che il ricorso a valutazioni indirette della velocità delle onde di taglio V_S partendo dai valori di N_{SPT} tramite correlazioni di letteratura o anche da correlazioni specifiche ricavate da dati in sito, possono condurre a errore o grossolane stime delle stesse velocità.

Questa conclusione è in realtà congruente se si considera che le prove SPT, peraltro molto rudimentali, si basano su un meccanismo di rottura dinamico, per penetrazione nel terreno, che non ha particolari affinità con i meccanismi che regolano la trasmissione di onde di taglio, le quali si trasmettono per deformazione elastica senza che si inneschino le rotture e le dislocazioni che si hanno con le prove SPT.

Altri lavori disponibili in letteratura hanno invece individuato correlazioni che sono risultati efficaci relativamente al set di dati analizzato; queste correlazioni sono spesso utilizzate in campo applicativo per

la stima indiretta delle velocità delle onde di taglio e quindi della categoria sismica del sito. Queste correlazioni, applicate ai dati presentati in questo lavoro, non hanno però dimostrato una particolare efficacia.

Per i motivi suddetti è parso doveroso arrivare alle seguenti conclusioni che possono fornire alcuni spunti di riflessione per le future attività di ricerche e indicazioni in campo operativo.

- Una semplice applicazione delle correlazioni di letteratura per la stima delle velocità delle onde di taglio e per la definizione della classe sismica dei terreni a partire dalle prove SPT può condurre a risultati aleatori e inaffidabili, sia per le forti differenze tra le correlazioni disponibili, sia per il basso grado di affidabilità delle singole correlazioni.
- La definizione di correlazioni specifiche da studiare e tarare nel sito di interesse potrebbe aumentare il grado di affidabilità delle correlazioni stesse, ma alle seguenti condizioni:
 - di avere a disposizione un numero di dati sufficientemente rappresentativo delle diverse condizioni geologiche dei siti e delle caratteristiche granulometriche dei terreni interessati;
 - di effettuare un attento controllo sul campo durante l’esecuzione delle prove SPT in modo da individuare eventuali difetti od errori esecutivi eliminando i risultati evidentemente anomali;
 - di trattare i dati con tecniche statistiche (ad esempio regressione lineare multipla) che consentano di migliorare la qualità della correlazione;
 - di individuare eventuali classi granulometriche per le quali le correlazioni studiate possano essere più affidabili, ricavando quindi correlazioni utilizzabili solo per determinati terreni.

Le considerazioni tratte da questo studio, analogamente a quelle di precedenti altre ricerche, portano alla conclusione che per una corretta valutazione della risposta sismica locale è imprescindibile una misura diretta delle velocità delle onde di taglio e che è sempre necessario avvalersi di un supporto geologico che riesca a delineare i diversi assetti geologici dei siti di indagine, potendo individuare peraltro aspetti e problematiche a scala più ampia (effetti morfologici, presenza di frane, ecc..) che, indipendentemente dalla definizione della velocità delle onde di taglio, possa contribuire alla definizione dei vari aspetti che regolano la risposta sismica locale.

Correlazioni con prove SPT potrebbero essere utilizzate solo per estendere la caratterizzazione ad aree più ampie, ad esempio per studi di zonazione, ma solo nei casi in cui si abbiano a disposizione dati in numero statisticamente significativo, omogenei (in termini di classi di terreno e procedure di pro-

ve) e ripetibili, e solo quando sia possibile verificare l’affidabilità delle stesse correlazioni con taratura in sito.

Bibliografia

- ANDRUS R.D., PIRATHEEPAN P., ELLIS B.S., ZHANG J., JUANG C. H. (2004) - *Comparing Liquefaction Evaluation Methods using Penetration-Vs relationships*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24, pp. 713-721.
- ANDRUS R.D., STOKOE K.H. (2000) - *Liquefaction Resistance of Soils from Shear-Wave Velocity*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126, 11, pp. 1015-1025.
- ANDRUS R.D., ZHANG J., ELLIS B.S., JUANG C.H. (2003) - *Guide for Estimating the Dynamic Properties of South Carolina Soils for Ground Response Analysis*. FHWA SC-03-07, South Carolina Department of Transportation.
- ATHANASOPOULOS G.A. (1995) - *Empirical correlations Vs-N_{SPT} for soils of Greece: a comparative study of reliability*. Proc. 7th Int. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Engineering (Chania, Crete) A.S. Cakmak (Southampton: Computational Mechanics), pp. 19-36.
- BAGLIONE M., FERRINI M., MENSÌ E., PALLARA O., LO PRESTI D., SQUEGLIA N. (2007) - *Caratterizzazione meccanica dei depositi di terreni mediante prove penetrometriche dinamiche alla luce dei risultati acquisiti nell’ambito del progetto V.E.L. della Regione Toscana*. Atti del Convegno ANIDIS, Pisa.
- BRANDENBERG S.J., BALLANA N., SHANTZ T. (2010) - *Shear Wave Velocity as a Statistical Function of Standard penetration test resistance and Vertical Effective Stress at Caltrans Bridge Sites*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, Report 3.
- COLLOTTA T., BONGIO P., BOERIO V., TOGNALA B. (2009) - *V_s=f(N_{SPT}): esperienze e considerazioni applicative*. Atti del Convegno ANIDIS, Bologna.
- DEJONG J.T. (2007) - *Site Characterization – Guidelines for Estimating Vs Based on In-Situ tests. Stage 1 – Interim Report*. Soil Interactions Laboratory, University of California, Davis.
- DIKMEN U. (2009) - *Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils*. Journal of Geophysics and Engineering, 6, pp. 61-72.
- FUJIWARA T. (1972) - *Estimation of ground movements in actual destructive earthquakes*. Proc. 4th European Symposium of Earthquake Engineering, London, pp. 125-132.
- HASANCEBI N., ULUSAY R. (2006) - *Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 66, pp. 203-213.
- IMAI T. (1977) - *P-and S-wave velocities of the ground in Japan*. Proc. 9th Int. Conf. on Soil Mechanics and

- Foundation Engineering, Tokyo, 2, pp. 257-260.
- IMAI T., TONOUCHI K. (1982) - *Correlation of N-value with S-wave velocity and shear modulus*. Proc. 2nd European Symposium of Penetration Testing, Amsterdam, pp. 57-72.
- IMAI T., YOSHIMURA Y. (1975) - *The relation of mechanical properties of soils to P and S-wave velocities for ground in Japan*. Technical Note, OYO Corporation.
- JAFARI M.K., SHAFIEE A., RAMZKHAH A. (2002) - *Dynamic Properties of Fine Grained Soils in South of Tehran*. Journal of Seismology and Earthquake Engineering, 4, n.1, pp. 25-35.
- JINAN Z. (1987) - *Correlation between seismic wave velocity and the number of blow of SPT and depth*. Selected Papers from the Chinese Journal of Geotechnical Engineering, pp. 92-100.
- KIKU H., YOSHIDA N., YASUDA S., IRISAWA T., NAKAZAWA H., SHIMIZU Y., ANSAL A., ERKAN A. (2001) - *In-situ penetration tests and soil profiling in Adapazari, Turkey*. XV ICSNGE/TC4 Satellite Conference on "Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes", Istanbul, pp. 259-265.
- LEE S.H.H. (1990) - *Regression models of shear wave velocities*. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 13, pp. 519-532.
- LIAO S.S.C., WHITMAN R.V. (1986) - *Overburden Correction Factors for SPT in Sand*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 112, n. 3, pp. 373-377.
- OHSAKI Y., IWASAKI R. (1973) - *On dynamic shear modulus and Poisson's ratio of soil deposits*. Soil Foundations, 13, pp. 61-73.
- OHTA Y., GOTO N. (1978) - *Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 6, pp. 167-187.
- OHTA T., HARA A., NIWA M., SAKANO T. (1972) - *Elastic shear moduli as estimated from N-value*. Proc. 7th Ann. Convention of Japan Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 265-268.
- PIRATHEEPAN P., ANDRUS R.D. (2002) - *Estimating Shear-Wave Velocity from SPT and CPT data*. Final Report to U.S. Geological Survey, Award Number 01HQ0007, Clemson University, Clemson, SC.
- PITILAKIS K., RAPTAKIS D., LONTZETIDI K.T., VASSILIKOU T., JONGMANS D. (1999) - *Geotechnical and geophysical description of Euro-Seistests, using field and laboratory tests, and moderate strong ground motions*. Journal of Earthquake Engineering, 3, n. 3, pp. 381-409.
- SEED H.B., IDRIS I.M. (1981) - *Evaluation of liquefaction potential sand deposits based on observation of performance in previous earthquakes*. ASCE National Convention, Missouri, pp. 81-544.
- SHIBATA T. (1970) - *Analysis of liquefaction of saturated sand during cyclic loading*. Disaster Prevention Research Institute Bulletin, 13, pp. 563-570.
- SISMAN H. (1995) - *An investigation on relationships between shear wave velocity, and SPT, and pressuremeter test results*. M.Sc. Thesis, Ankara University, Geophysical Engineering Department.
- SYKORA D.E., STOKOE K.H. (1983) - *Correlations of in-situ measurements in sands of shear wave velocity*. Soil Dynamic Earthquake Engineering, 20, pp. 125-136.
- SYKORA D.W., KOESTER P.J. (1988) - *Correlations between dynamic shear resistance and standard penetration resistance in soils*. Earthquake Engineering and Soil Dynamics II: Recent Advances in Ground-Motion Evaluation, J.L. Von Thun (Ed.), Geotechnical Special Publication, 20, pp. 389-404.
- ULUGGERLERLI U. E., UYANIK O. (2007) - *Statistical correlations between seismic wave velocities and SPT blow counts and the relative density of soils*. Journal of Testing and Evaluation, 35, n. 2, pp. 187-191.
- VESSIA G., CHERUBINI C., FERRINI M., BAGLIONE M., RAINONE M.L., SIGNANINI P. (2007) - *Caratterizzazione dinamica dei terreni mediante prove S.P.T.: esperienze, applicabilità, limiti*. Atti del XII Convegno "L'ingegneria Sismica in Italia" ANIDIS, Pisa.
- YAMADA S., HYODO M., ORENSE R.P., DINESH S.V. (2008) - *Initial Shear Modulus of Remolded Sand-Clay Mixtures*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 134, n.7, pp. 960-971.
- YOSHIDA Y., IKEMI M., KOKUSHO T. (1988) - *Empirical formulas of SPT blow-counts for gravelly soils*. Proceedings of the 1st International Symposium on Penetration Testing ISOPT-1, Orlando, Balkema, Rotterdam, 1, pp. 381-387.

Evaluation of the SPT test reliability in the seismic characterization of soils

Summary

The results of a vast campaign of geotechnical investigations required for the seismic assessment of roadway bridges located along the ANAS road network are reported in this paper. The bridges are located in various northern and southern Italian regions characterized by a medium to high seismicity. Evaluation of shear wave velocity has been investigated comparing SPT values to those obtained by means of direct down-hole measurements.

Results seem to confirm over the weak correlation between SPT and shear wave velocity independently of geological and geotechnical conditions. When evaluation of shear wave velocity is required to model the seismic behavior of soils and foundations, the only reliable tool is the direct measurement with geophysical techniques.