

Sulla valutazione della velocità di propagazione delle onde di taglio da prove penetrometriche statiche per i depositi alluvionali ferraresi

Daniela Giretti,* Alessio Colombi,* Vincenzo Fioravante*

Sommario

Scopo della presente nota è fornire alcune correlazioni empiriche per la valutazione della velocità di propagazione delle onde di taglio, V_S , dal valore della resistenza alla punta q_c di prove penetrometriche statiche, eseguite nei terreni alluvionali ferraresi.

Questa valutazione si inserisce nell'ambito di uno studio per la quantificazione degli effetti di amplificazione sismica locale in ambito provinciale (microzonazione sismica) che il Gruppo Geotecnico del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara conduce per conto della Provincia di Ferrara, finalizzato all'adeguamento degli strumenti urbanistici di pianificazione alle recenti disposizioni legislative nazionali e regionali per la mitigazione del rischio sismico.

Partendo da correlazioni presenti nella letteratura geotecnica, è stata eseguita una calibrazione diretta sui terreni ferraresi, basandosi sui risultati di una recente campagna di indagini realizzate nell'ambito del progetto dell'idrovia ferrarese; tale campagna, consistente in sondaggi geognostici con prelievo di campioni indisturbati sottoposti a prove di laboratorio, prove CPT e down-hole con cono sismico, ha consentito una buona caratterizzazione geotecnica di molti siti interessati dal progetto.

Allo scopo di ottenere correlazioni il più affidabili possibile, i dati sono stati attentamente analizzati e, per ridurre le incertezze causate dall'eterogeneità che caratterizza i depositi alluvionali, i terreni studiati sono stati suddivisi in tre famiglie, distinguendo argille, limi e sabbie; per ciascun litotipo sono stati calibrati i coefficienti empirici delle correlazioni. Infine, per valutare la capacità delle correlazioni ottenute, sono stati confrontati i valori di V_S calcolati con quelli misurati da prove down-hole eseguite in quattro dei siti investigati.

1. Introduzione

A seguito delle recenti disposizioni legislative nazionali (O.P.C.M. 3274/2003, D.M. 14/09/2005) e regionali (Delibera Regionale 1677-2005) la Provincia di Ferrara ha iniziato un processo di adeguamento degli strumenti di pianificazione urbanistica e di protezione civile, finalizzato alla mitigazione del rischio sismico. In particolare il primo obiettivo è stato quello di definire la classe di appartenenza dei terreni e di quantificare gli effetti di amplificazione sismica locale in un'area molto estesa, dove la natura alluvionale recente dei depositi giustifica l'elevata eterogeneità degli stessi sia con la profondità (si tratta di alternanze di materiali di diversa litologia) che in senso areale (le sequenze e gli spessori degli strati cambiano spostandosi anche a pochi decimetri di distanza). Le indagini geotecniche ad oggi disponibili consistono in una relativa abbondanza di prove penetrometriche statiche e poche misure dirette della velocità di propagazione delle onde di taglio.

Una recente campagna di indagini eseguite per il progetto della cosiddetta "idrovia ferrarese", ovvero l'adeguamento del canale navigabile di collegamento tra il fiume Po ed il mare Adriatico alla navigazione di natanti di classe V Europea, ha previsto, per un significativo numero di punti di indagine, l'esecuzione di prove down-hole con cono sismico a due ricevitori (SCPTu), quindi con la misura della velocità di propagazione delle onde di taglio, V_S , con la profondità.

Nell'ambito degli studi di microzonazione sismica condotti dal Gruppo Geotecnico del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara per conto dell'Amministrazione Provinciale di Ferrara, si è proceduto alla ricerca di una correlazione empirica tra la V_S e la resistenza alla punta q_c di prove CPT, basandosi su note espressioni recentemente presentate da vari ricercatori; tali correlazioni sono state calibrate per i terreni alluvionali in esame.

2. Inquadramento geologico e geomorfologico dell'area

I siti indagati si trovano all'interno della Pianura Padana, bacino sedimentario costituito da una

* Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara

spessa coltre di sedimenti, marini in profondità e fluviali più in superficie, depositati questi ultimi dai corsi d'acqua alpini ed appenninici nell'antico Golfo Padano (insenatura del Mare Adriatico presente tra le Alpi e gli Appennini).

Il fondo del bacino sedimentario è caratterizzato da numerose pieghe, provocate dai movimenti tettonici che hanno dato origine alla catena alpina ed appenninica. In particolare una di queste costituisce la cosiddetta Dorsale ferrarese, formata da una serie di pieghe anticlinali associate a faglie, il cui movimento è la causa dei terremoti che si sono registrati nella zona.

Nella pianura ferrarese si possono riconoscere due ambienti deposizionali principali: il primo, di origine alluvionale, è costituito dalla piana deltizia del Fiume Po; il secondo, in prossimità del mare Adriatico, è invece un ambiente deposizionale di tipo costiero.

I depositi alluvionali tipici dell'area indagata sono caratterizzati da una marcata eterogeneità, con alternanza di materiali a grana grossa e a grana fine, imputabile principalmente alle variazioni del regime del flusso delle acque. In particolare le zone oggetto di studio presentano fino a circa 20-30 m di profondità alternanze di strati limo-argillosi e limo-sabbiosi, seguiti in genere, ma non sempre, dalla presenza di materiali prevalentemente a grana grossa (sabbie da sciolte a mediamente dense).

3. Caratterizzazione geotecnica dell'area

La calibrazione delle correlazioni empiriche tra V_S e q_c è stata effettuata sulla base delle prove eseguite in vari siti ben caratterizzati dal punto di vista geotecnico e rappresentativi dei tipi di terreno presenti nell'area ferrarese. I siti oggetto dello studio presentato nella nota sono individuati all'interno della carta geomorfologica dell'area in Figura 1.

La campagna di caratterizzazione geotecnica dei terreni presenti è consistita nell'esecuzione di 54 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono (CPTu), di cui 32 con cono sismico (SCPTu) per la misura di V_S , spinte a profondità variabili da 20 a 40 m dal piano campagna; i valori di V_S sono stati misurati a intervalli di 1 m, per un numero complessivo di misure pari a 854. Sono stati eseguiti 27 sondaggi geognostici a carotaggio continuo con prelievo di 110 campioni indisturbati e, in corrispondenza degli strati di materiale a grana grossa, prove penetrometriche dinamiche (SPT) in foro di sondaggio, con prelievo di 46 campioni rimaneggiati. I campioni indisturbati prelevati sono stati sottoposti a prove di laboratorio di classificazione, prove di compressione in cella triassiale e prove di consolidazione edometrica, al fine di definire le proprietà di resistenza e deformabilità dei tipi litologici incontrati.

Le misure di V_S sono state effettuate mediante il cono sismico con una configurazione di prova tipo

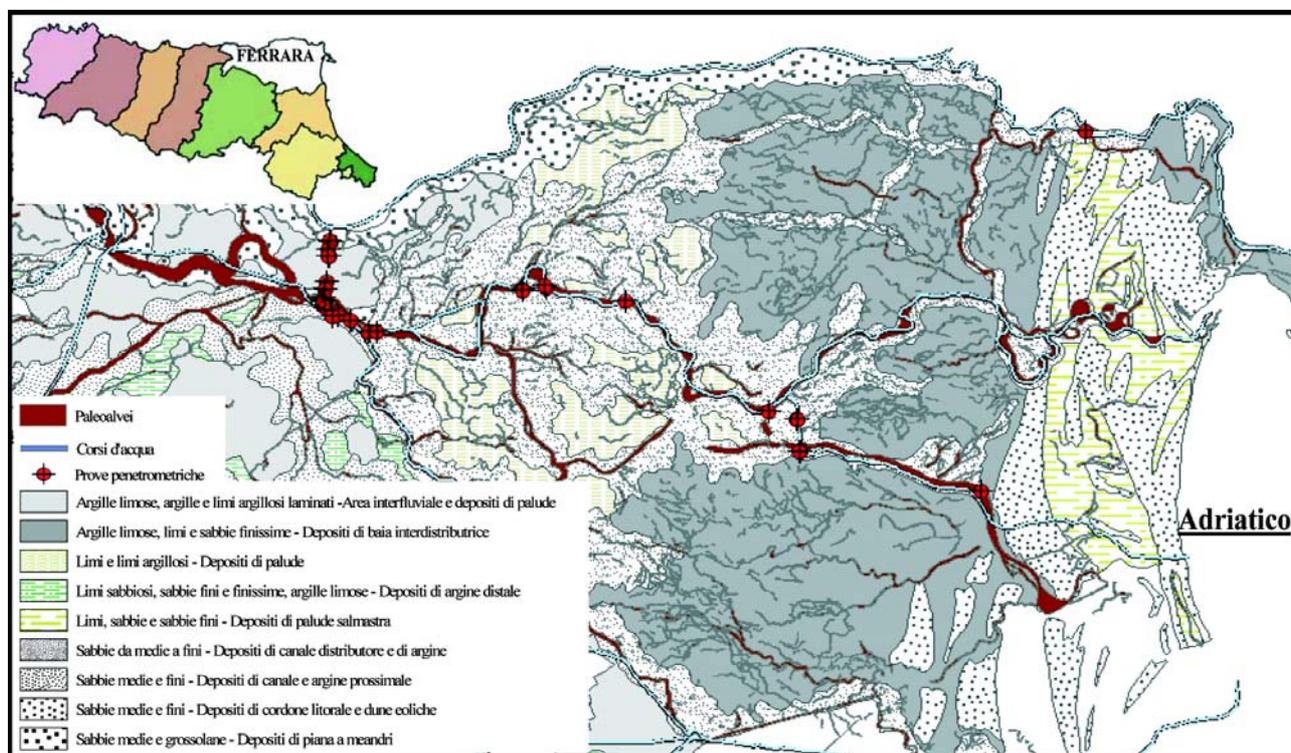


Fig. 1 – Carta geomorfologica dell'area oggetto dello studio con individuazione dei siti analizzati.

Fig. 1 – Geomorphological map of the studied area with location of the analysed sites.

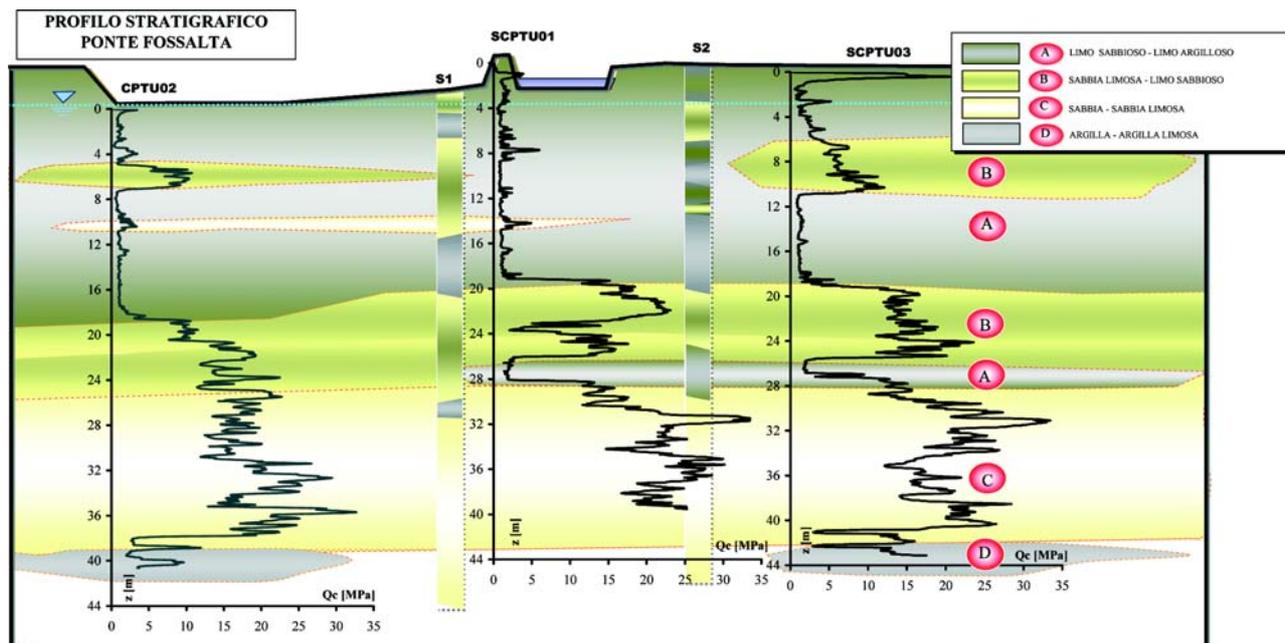


Fig. 2 – Sezione stratigrafica del sito di Fossalta.

Fig. 2 – Soil profile of Fossalta site.

down-hole; la punta sismica utilizzata era attrezzata con due geofoni posizionati a distanza di 1 m e le registrazioni dei segnali sono state interpretate con il metodo del True Time Interval [FIORAVANTE, 2004].

In Figura 2 è rappresentata una tipica sezione stratigrafica ottenuta dai risultati delle indagini condotte in prossimità di un ponte di attraversamento del canale navigabile, in località Fossalta.

Per tutti i siti indagati si è proceduto ad una completa caratterizzazione geotecnica come mostrato – per brevità – nelle Figure 3, 4 e 5, le quali rappresentano tre sequenze litostratigrafiche tipo ottenute per tre siti rappresentativi:

- il primo sito, ubicato nei pressi dell'abitato di Ostellato, presenta un terreno a matrice prevalentemente a grana fine per tutti i 40 metri indagati, con rare intercalazioni di materiale più grossolano; sono presenti due strati di sabbia fine a 15 e 22 m di profondità dal piano di campagna locale, aventi spessore di 2 e 4 m rispettivamente;
- il secondo sito, in località Fossalta, presenta un'alternanza di limi argillosi e limi sabbiosi nei primi 20 m di profondità seguiti da uno strato sabbioso che si estende fino alla massima profondità indagata;
- il terzo sito, ubicato lungo le sponde del Canale Boicelli, nella città di Ferrara, dopo 5 m circa di limi sabbiosi ed argillosi, risulta caratterizzato da uno spesso strato di sabbia pressoché omogenea fino a circa 28 m di profondità, al di sotto del quale vi è uno strato di argilla limosa, fino alla massima profondità indagata (30 m).

Nelle Figure 3 e 4 sono altresì riportati i risultati delle prove di classificazione dei campioni indisturbati prelevati, mentre in Figura 5 sono riportati i risultati delle prove penetrometriche dinamiche (SPT) eseguite in foro di sondaggio e quelli delle prove granulometriche dei campioni rimaneggiati, associati alle prove SPT.

La Figura 6 mostra i risultati dell'interpretazione delle prove SCPTu per la definizione dei tipi litologici, realizzata utilizzando la correlazione proposta da ROBERTSON [1990]. Tali risultati sono serviti per integrare, laddove necessario, le informazioni dirette ottenute dai sondaggi geognostici (che sono stati eseguiti in minore quantità) e dalle prove di classificazione eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi stessi.

Come si può osservare dalla Figura 6, i terreni indagati variano da materiali a matrice fine (limi argillosi, argille limose – zone 2, 3 e 4 di figura) rilevati in genere nei primi 25 m circa di profondità a terreni a matrice granulare (sabbie e sabbie limose – zone 5 e 6 di figura) rinvenuti in genere a profondità superiori ai 25 m.

Sempre a titolo di esempio, la Figura 7 riporta gli andamenti di q_c e V_s misurati nel corso di due prove SCPTu, eseguite presso i siti di Ostellato (a) e Fossalta (b). È evidente una maggiore sensibilità alle inclusioni di materiali di diversa natura, della misura di q_c rispetto alla misura di V_s , che invece risente solo delle variazioni stratigrafiche più significative: riferire l'andamento della V_s a quello della q_c migliora la capacità di definizione del profilo della rigidità dei terreni indagati.

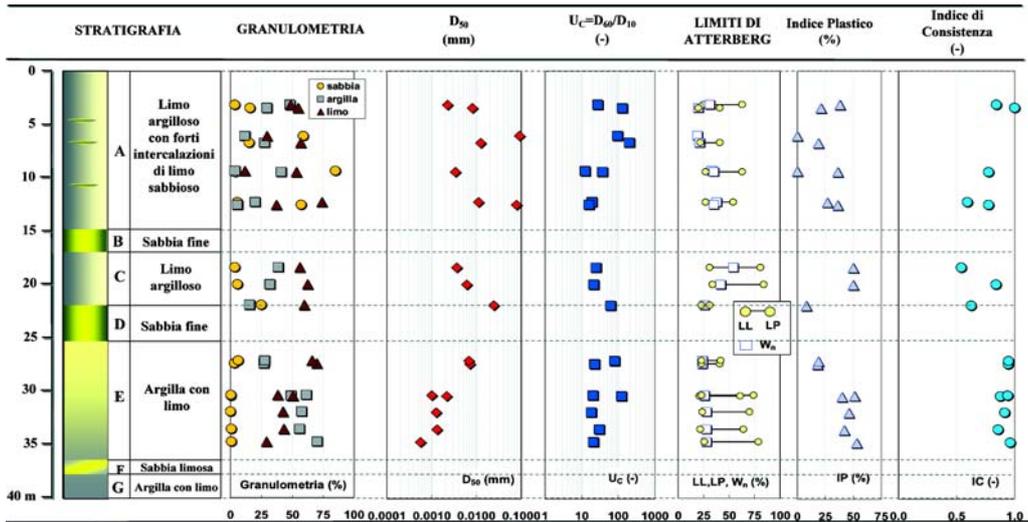


Fig. 3 – Sequenza litostratigrafica del sito di Ostellato.

Fig. 3 – Soil profile of Ostellato site.

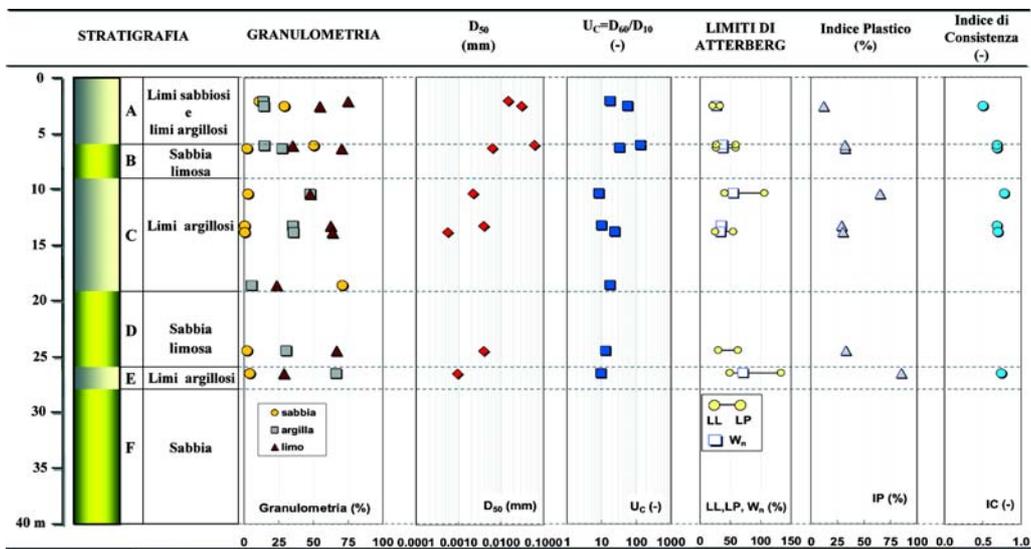


Fig. 4 – Sequenza litostratigrafica del sito di Fossalta.

Fig. 4 – Soil profile of Fossalta site.

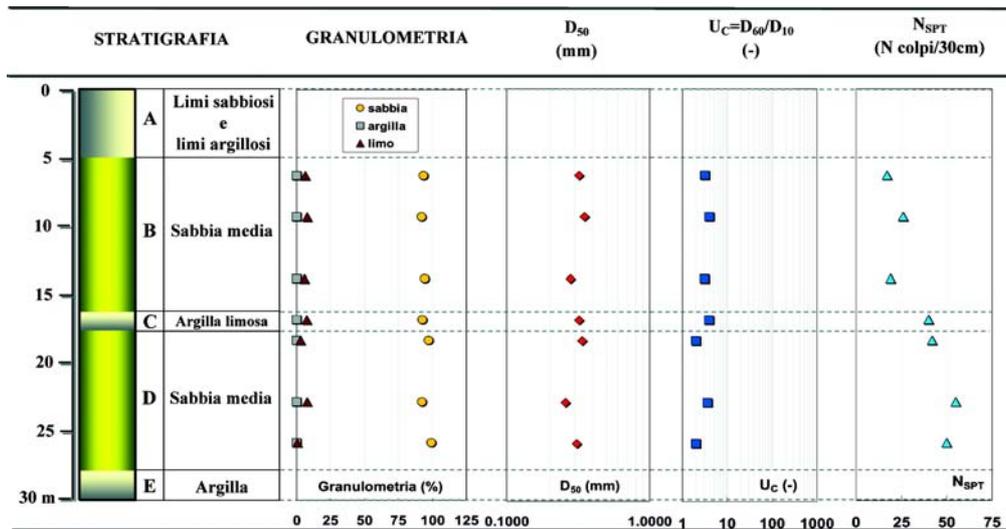
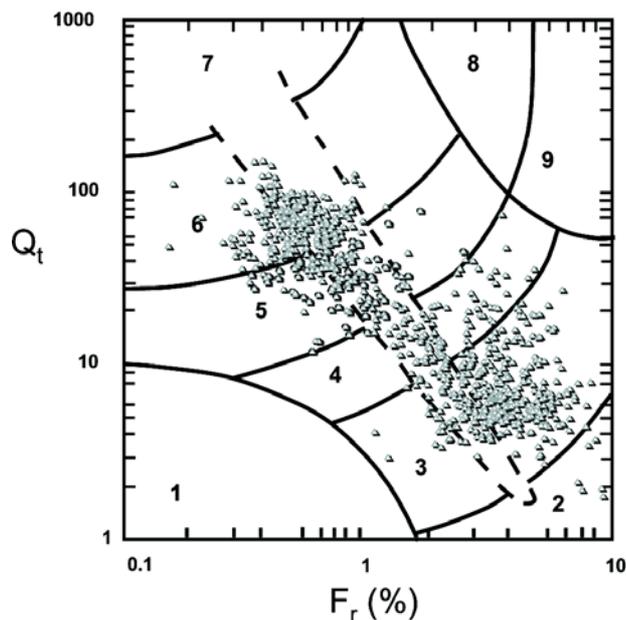


Fig. 5 – Sequenza litostratigrafica del Ponte Ferroviario, Canale Boicelli.

Fig. 5 – Soil profile of railway bridge, Boicelli channel.



$$Q_t = \frac{q_c - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \quad F_r = \frac{f_s}{q_c - \sigma_{v0}} \cdot 100\%$$

Litotipi

1. Terreno sensitivo a grana fine.
2. Terreno organico, torba.
3. Argille ed argille limose.
4. Limi argillosi ed argille limose.
5. Sabbie limose e limi sabbiosi.
6. Sabbie pulite e sabbie limose.
7. Sabbie ghiaiose e sabbie.
8. Sabbie molto dense e sabbie argillose.
9. Materiali fini molto consistenti.

Fig. 6 – Classificazione dei terreni presenti nei siti analizzati a partire da prove SCPT [da ROBERTSON, 1990].

Fig. 6 – SCPT-based soil classification of analysed sites [from ROBERTSON, 1990].

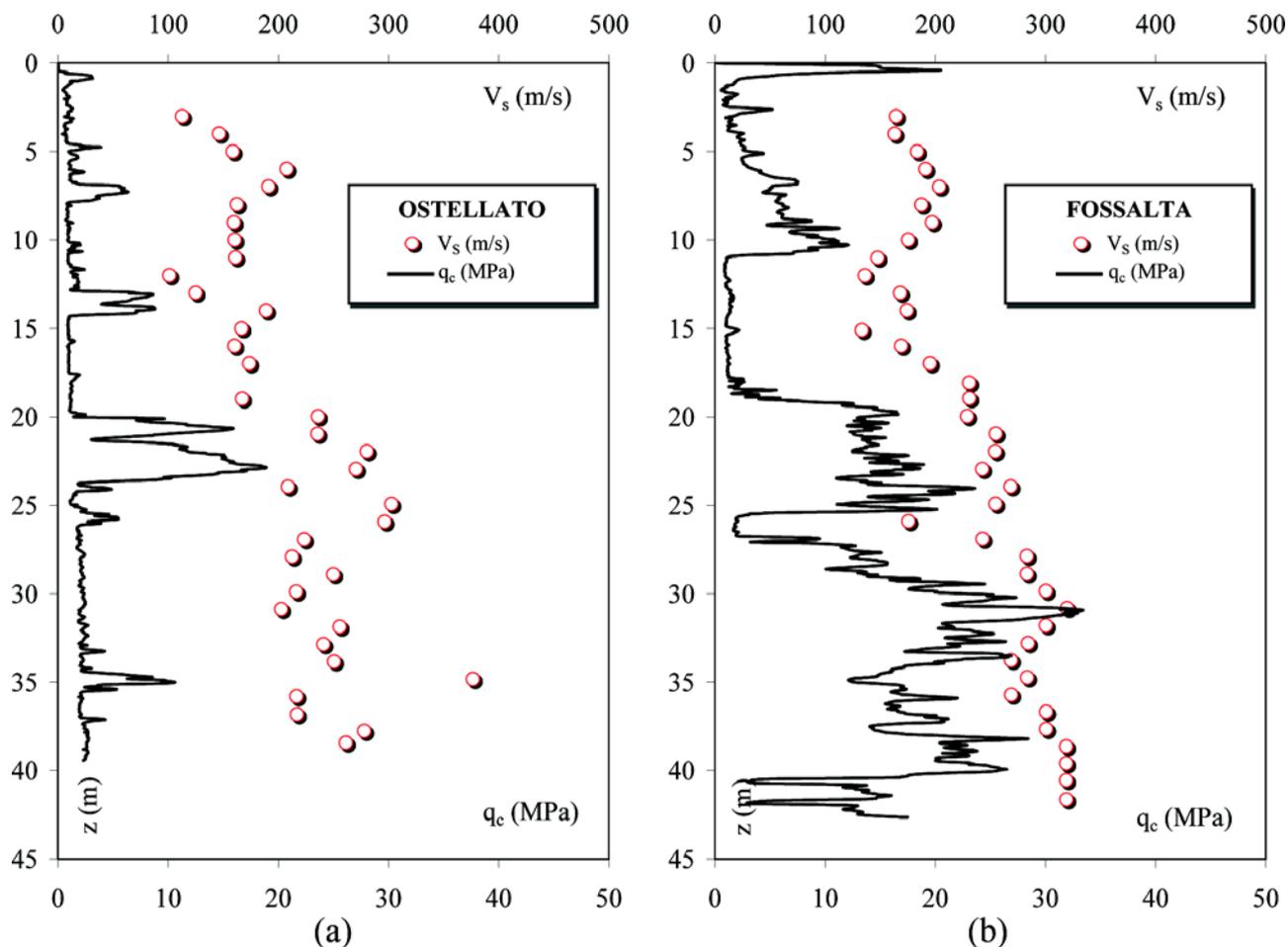


Fig. 7 – Andamenti di q_c e V_s misurati nei siti di Ostellato (a) e Fossalta (b).

Fig. 7 – Measured q_c and V_s profiles in Ostellato (a) and Fossalta (b) sites.

Tab. I – Coefficienti A (m/s), α e β , media $(V_{S,e}/V_{S,m})_{av}$ e deviazione standard $(V_{S,e}/V_{S,m})_{st.dev}$ della regressione dell'Eq. (4) e numero N di dati analizzati per i tre tipi litologici considerati.

Tab. I – A (m/s), α and β coefficients, average $(V_{S,e}/V_{S,m})_{av}$ and standard deviation $(V_{S,e}/V_{S,m})_{st.dev}$ for Eq. (4) and number N of analysed data.

	<i>Argilla</i>	<i>Limo</i>	<i>Sabbia</i>
A	63.89	41.052	48.50
α	0.37	0.408	0.37
β	-0.04	-0.057	0.06
$(V_{S,e}/V_{S,m})_{av}$	1.028	1.027	1.029
$(V_{S,e}/V_{S,m})_{st.dev}$	0.174	0.171	0.168
N	231	93	179

4. Scelta e calibrazione di una correlazione tra q_c e V_S

La resistenza alla punta q_c e la rigidezza in campo elastico (deformazioni molto piccole), espressa come modulo di taglio G_0 , dipendono dai parametri di stato del materiale attraversato, ovvero, nel caso di terreni non cementati, dall'indice dei vuoti, dallo stato tensionale efficace verticale e orizzontale e dal grado di sovraconsolidazione (quest'ultimo prevalentemente per i terreni a grana fine). In forma funzionale si può genericamente scrivere:

$$q_c = f_q(e, \sigma'_{ij}, OCR) \quad [FL^{-2}] \quad (1a)$$

$$G_0 = f_G(e, \sigma'_{ij}, OCR) \quad [FL^{-2}] \quad (1b)$$

La sola dipendenza dallo stato tensionale verticale efficace, può essere espressa mediante funzioni del tipo [BALDI *et al.*, 1989; FIORAVANTE, 2000; JAMIOLKOWSKI *et al.*, 2003]:

$$q_c = h_q(\sigma'_v)^\alpha \quad [FL^{-2}] \quad (2a)$$

$$G_0 = h_G(\sigma'_v)^\beta \quad [FL^{-2}] \quad (2b)$$

dove i valori degli esponenti α e β sono pressoché uguali a 0.5 per entrambe le relazioni.

Poiché la velocità di propagazione delle onde di taglio in un mezzo elastico lineare risulta essere: $V_S = (G_0/\rho)^{0.5}$, con ρ = densità del mezzo, è possibile fare riferimento alle due seguenti espressioni:

$$q_c = g_q(\sigma'_v)^{0.5} \quad [FL^{-2}] \quad (3a)$$

$$V_S = g_G(\sigma'_v)^{0.25} \quad [LT^{-1}] \quad (3b)$$

Questa similitudine di funzionalità dai parametri di stato giustifica la presenza in letteratura di numerose correlazioni empiriche tra le misure di q_c e di V_S [HEGAZY e MAYNE, 1995; ANDRUS *et al.*, 2001; PIRATHEEPAN, 2002; MADIAT e SIMONI, 2002, 2004; ANDRUS *et al.*, 2003; SCHNEIDER *et al.*, 2004]. Tuttavia il

livello deformativo indotto nel terreno dalla penetrazione della punta penetrometrica provoca la rottura del materiale, mentre le onde di taglio si propagano non intaccando la struttura del terreno, in condizioni di deformazioni praticamente elastiche [MAYNE e Rix, 1995; FAHEY, 1998, 2001; HOULSBY, 2001].

Le correlazioni empiriche utilizzate sono state calibrate distinguendo le litologie dei terreni rinvenuti e raggruppandoli in tre famiglie: argille, limi e sabbie. Tale distinzione si è resa necessaria a causa della significativa eterogeneità dei terreni interessati, per migliorare l'affidabilità delle funzioni.

La prima espressione analizzata, proposta da HEGAZY e MAYNE [1995], mette in relazione la velocità V_S ai valori normalizzati di q_c ed f_s , secondo la seguente correlazione:

$$V_S = A \cdot \left(\frac{q_c}{p_a}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{f_s}{p_a}\right)^\beta \quad [LT^{-1}] \quad (4)$$

dove A [LT^{-1}], α e β sono coefficienti empirici da calibrare per ciascun litotipo, sulla base delle misure di q_c e V_S disponibili e p_a è la pressione atmosferica, da utilizzare come valore di riferimento per rendere dimensionalmente corretta l'espressione.

I valori di V_S sono stati misurati ad intervalli di 1 m, mentre le misure di q_c e f_s sono state registrate ogni 2 cm, pertanto si è reso necessario mediare tali valori ogni metro di profondità, escludendo dalla media i dati misurati in corrispondenza dei picchi del profilo penetrometrico dovuti a discontinuità locali.

Sulla base delle misure eseguite nei vari siti oggetto del presente studio sono stati ricavati i coefficienti A , α e β utilizzando una regressione ai minimi quadrati.

La Tabella I riporta i coefficienti ottenuti, ricavati esprimendo le tensioni e la pressione atmosferica in MPa e la velocità in m/s; sono inoltre riportati il valore medio $(V_{S,e}/V_{S,m})_{av}$ del rapporto tra i valori

Tab. II – Coefficienti A (m/s) e α , media $(V_{S,e}/V_{S,m})_{av}$ e deviazione standard $(V_{S,e}/V_{S,m})_{st.dev}$ della regressione dell'Eq. (5) e numero N di dati analizzati per i tre tipi litologici considerati.

Tab. II – A (m/s) and α coefficients, average $(V_{S,e}/V_{S,m})_{av}$ and standard deviation $(V_{S,e}/V_{S,m})_{st.dev}$ for Eq. (5) and number N of analysed data.

	<i>Argilla</i>	<i>Limo</i>	<i>Sabbia</i>
A	71.54	52.98	33.40
α	0.34	0.356	0.44
$(V_{S,e}/V_{S,m})_{av}$	1.028	1.027	1.029
$(V_{S,e}/V_{S,m})_{st.dev}$	0.176	0.172	0.169
N	231	93	179

calcolati, $V_{S,e}$, e quelli misurati, $V_{S,m}$, la corrispondente deviazione standard, $(V_{S,e}/V_{S,m})_{st.dev}$, e il numero dei dati analizzati, N .

Il valore di β risulta molto piccolo o addirittura negativo per le argille ed il limo, significando la scarsa influenza della misura di attrito laterale f_s ; questo risultato spinge verso le correlazioni successive, che lo trascurano.

Nella Figura 8 sono confrontati i valori di V_S misurati con quelli calcolati per i tre tipi litologici considerati. Si può osservare una certa dispersione dei valori predetti rispetto a quelli misurati, con uno scarto non sempre inferiore al 20%.

La seconda espressione valutata, proposta da RIX e STOKOE [1991], non considera la misura dell'attrito laterale f_s , e risulta pertanto:

$$V_S = A \cdot \left(\frac{q_c}{p_a} \right)^\alpha \quad [LT^{-1}] \quad (5)$$

dove A [LT^{-1}] e α sono coefficienti empirici da calibrare sulla base delle misure di q_c e di V_S disponibili e p_a è la pressione atmosferica.

Nella Tabella II sono riportati i coefficienti di regressione ottenuti per tale correlazione.

Nella Figura 9 sono confrontati i valori della velocità misurati con quelli calcolati distinguendo

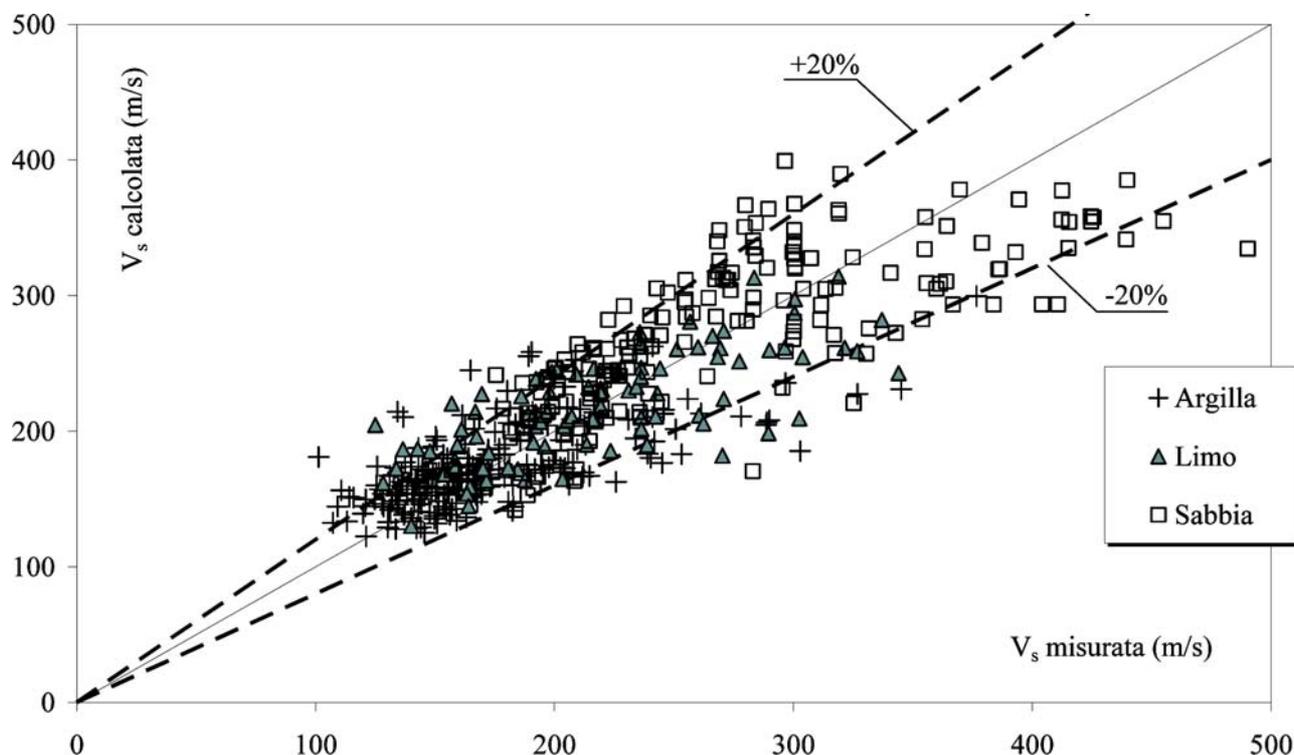


Fig. 8 – Confronto tra valori misurati di V_S e valori stimati utilizzando l'Eq. (4).

Fig. 8 – Measured versus estimated V_S values using Eq. (4).

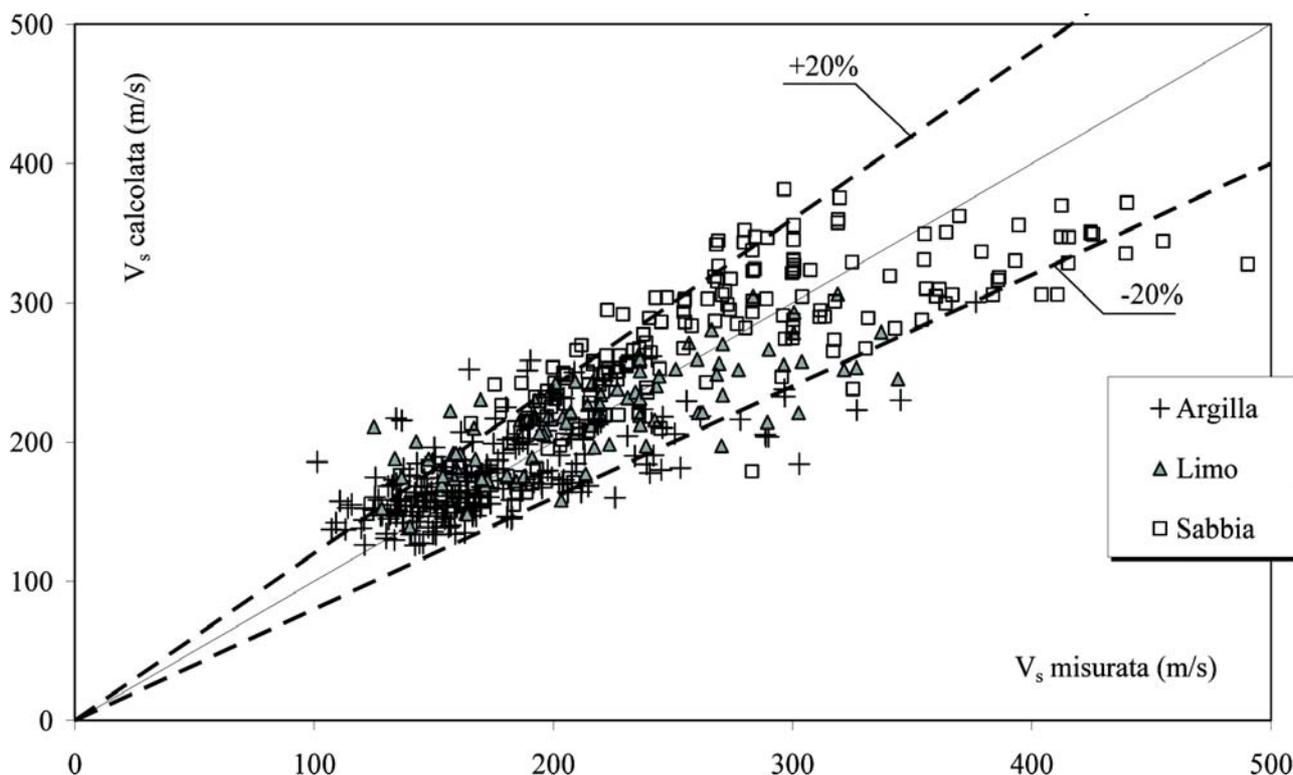


Fig. 9 – Confronto tra valori misurati di V_S e valori stimati utilizzando l'Eq. (5).

Fig. 9 – Measured versus estimated V_S values using Eq. (5).

sempre tra terreni argillosi, limosi e sabbiosi. Si può osservare che l'Equazione (5) fornisce, rispetto all'Espressione (4), una dispersione dei valori calcolati rispetto a quelli misurati analoga e non produce nessun significativo peggioramento in termini di deviazione standard.

È stata infine valutata l'espressione proposta da ANDRUS *et al.* [2001] che utilizza valori di V_S e q_c normalizzati rispetto allo stato tensionale; anche in questa espressione non viene utilizzata la misura dell'attrito laterale f_s ed è introdotto un coefficiente correttivo per l'età del deposito, indicato con ASF nell'Equazione (6). Questo coefficiente viene utilizzato per considerare le differenti caratteristiche di deformabilità e tessitura dei terreni risalenti al periodo Pleistocenico rispetto ai più recenti depositi Olocenici.

La correlazione proposta è così definita:

$$V_{S1} = ASF \cdot A \cdot (q_{c1N})^\alpha \quad [LT^{-1}] \quad (6)$$

dove:

$q_{c1N} = (q_c/p_a) \cdot (p_a/\sigma'_v)^{0.5}$ [1]: resistenza alla punta normalizzata alla tensione verticale;

$V_{S1} = V_S (p_a/\sigma'_v)^{0.25}$ [LT^{-1}]: velocità corretta per tenere in conto lo stato tensionale verticale;

ASF = 1 [1]: come suggerito da ANDRUS *et al.* [2001] per i depositi Olocenici, quali sono in ge-

nerale i terreni presenti nella pianura ferrarese alle profondità indagate;

A [LT^{-1}] e α sono coefficienti empirici da calibrare sulla base delle misure di q_c e di V_S disponibili e p_a è la pressione atmosferica.

Nella Tabella III sono riportati i coefficienti relativi alla Correlazione (6). La deviazione standard mostra una, seppur lieve, riduzione delle dispersione, come mostrato nella Figura 10, dove sono confrontati i valori misurati della velocità di propagazione delle onde di taglio con quelli calcolati per i tre tipi litologici considerati. L'Espressione (6) risulta pertanto quella con il migliore adattamento ai valori sperimentali analizzati.

Nella Figura 11 sono raccolti e confrontati i profili misurati di V_S con la profondità e quelli calcolati utilizzando le Correlazioni (4), (5) e (6), per quattro tra i siti analizzati (Ostellato, Fossalta, Migliarino, Madonna). I valori di velocità di propagazione delle onde calcolati a partire dai profili di resistenza di prove CPT mediante le tre correlazioni proposte risultano in generale in buon accordo con i valori misurati di V_S , e colgono abbastanza bene anche fenomeni locali. Simili risultati sono stati ottenuti in tutti gli altri siti dove sono state eseguite prove down-hole con cono sismico.

Per quanto concerne i valori degli esponenti delle tre correlazioni ottenuti, si osserva che sono diversi da quelli presenti in letteratura, in quanto

Tab. III – Coefficienti A (m/s) e α , media $(V_{s,e}/V_{s,m})_{av}$ e deviazione standard $(V_{s,e}/V_{s,m})_{st.dev}$ della regressione dell'Eq. (6) e numero N di dati analizzati per i tre tipi litologici considerati.

Tab. III – A (m/s) and α coefficients, average $(V_{s,e}/V_{s,m})_{av}$ and standard deviation $(V_{s,e}/V_{s,m})_{st.dev}$ for Eq. (6) and number N of analysed data.

	<i>Argilla</i>	<i>Limo</i>	<i>Sabbia</i>
A	80.64	77.83	53.64
α	0.28	0.24	0.33
$(V_{s,e}/V_{s,m})_{av}$	1.027	1.03	1.037
$(V_{s,e}/V_{s,m})_{st.dev}$	0.167	0.167	0.163
N	231	93	179

particolarmente condizionati dalla natura dei terreni indagati, quindi la loro validità è fortemente locale, poco estendibile ad altri terreni [HEGAZY e MAYNE, 1995; RIX e STOKOE, 1991; ANDRUS *et al.*, 2001; MADIAI e SIMONI, 2004].

5. Considerazioni riassuntive

La resistenza alla punta q_c e la velocità V_s dipendono entrambe dai parametri di stato del terreno attraversato, ovvero, nel caso di terreni non cementati, dall'indice dei vuoti, dallo stato tensionale efficace verticale ed orizzontale e dal grado di sovraconsolidazione. Tuttavia, l'avanzamento della punta

penetrometrica genera rottura del terreno, mentre le onde di taglio si propagano non intaccandone la struttura, in condizioni di deformazioni praticamente elastiche.

Nonostante il diverso stato deformativo indotto nel terreno dall'esecuzione delle due prove, al fine di fornire uno strumento di previsione di prima approssimazione, si è tentata una calibrazione di relazioni empiriche che correlano le due misure tra loro; in particolare sono state considerate tre espressioni presenti in letteratura, indicate dalle Equazioni (4), (5) e (6).

La calibrazione condotta è risultata particolarmente difficoltosa quando applicata ai terreni alluvionali della pianura ferrarese, a causa dell'eteroge-

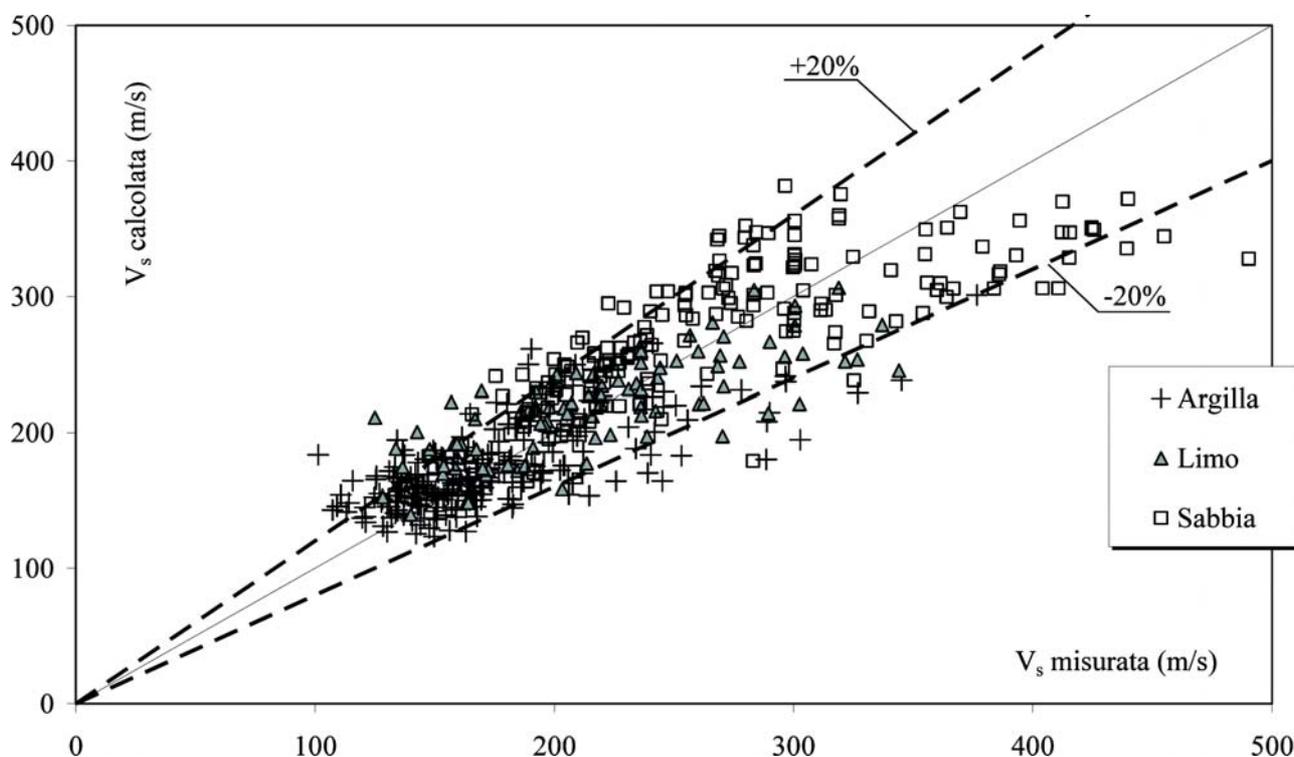


Fig. 10 – Confronto tra valori misurati di V_s e valori stimati utilizzando l'Eq. (6).

Fig. 10 – Measured versus estimated V_s values using Eq. (6).

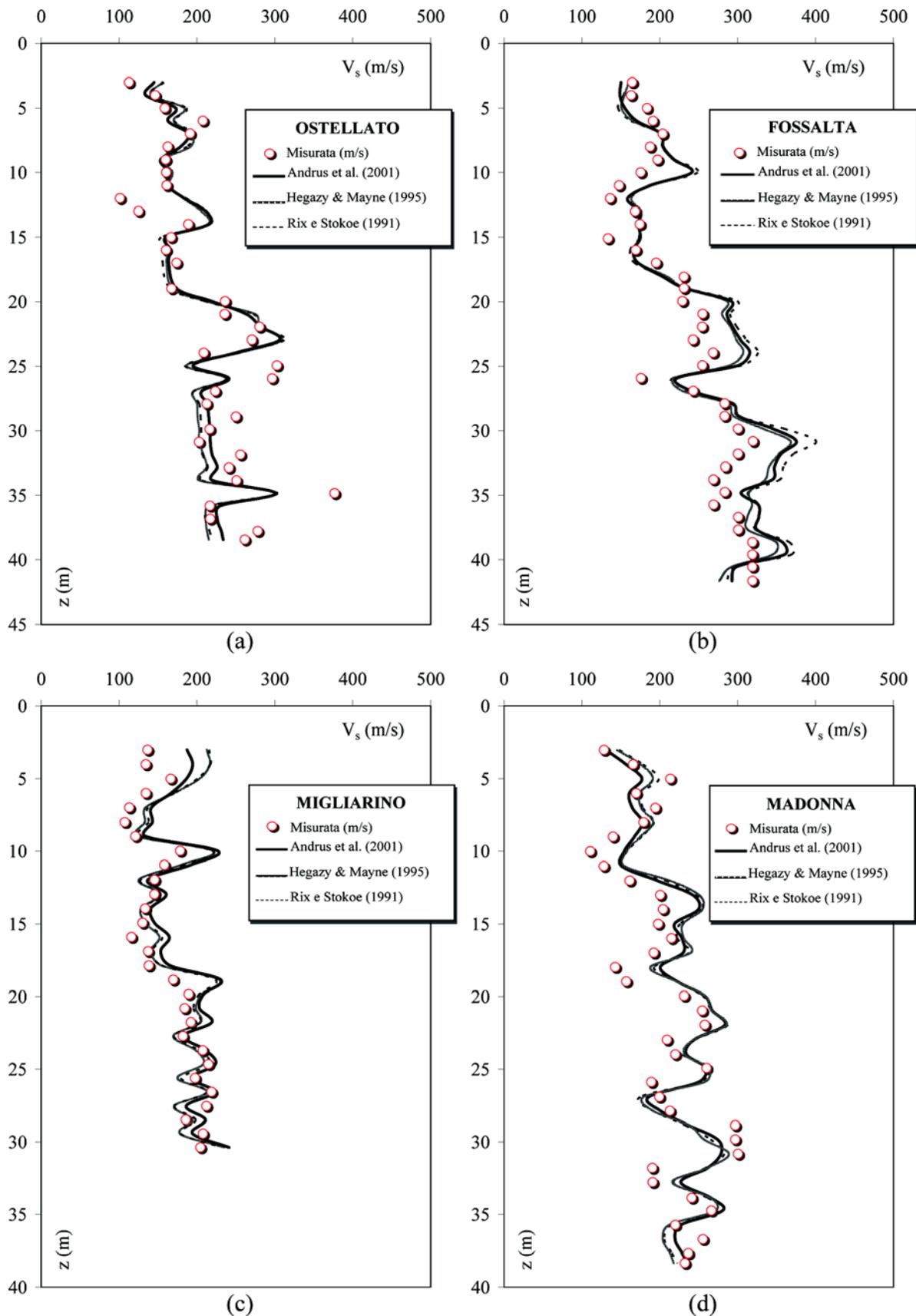


Fig. 11 – Profili di V_s misurati e calcolati con le Correlazioni (4), (5) e (6) per i siti di: (a) Ostellato, (b) Fossalta, (c) Migliarino, (d) Madonna.

Fig. 11 – Measured versus computed V_s profiles using Eqs. (4), (5) and (6) for different sites: (a) Ostellato, (b) Fossalta, (c) Migliarino, (d) Madonna.

neità degli stessi. È stato infatti necessario separare tre litotipi prevalenti ovvero argille, limi e sabbie per ottenere risultati attendibili con margini di errore accettabili in prima approssimazione.

I risultati ottenuti, pur soffrendo di limiti dovuti alla natura empirica del metodo, sembrano mostrare come le correlazioni empiriche adottate, di validità ristretta ad un certo ambito territoriale, possano essere utilmente impiegate per dedurre la velocità V_s dalla resistenza q_c , contenendo l'errore entro un margine accettabile, da impiegare solo per analisi su vasta scala.

Questo risultato, seppure incoraggiante, non deve lasciare dubbi sul fatto che le correlazioni non debbano surrogare la misura diretta di V_s , sempre raccomandata in tutte le indagini geognostiche ai fini delle valutazioni degli effetti di amplificazione sismica.

Ringraziamenti

Si ringrazia la Provincia di Ferrara nelle persone del Capo del Servizio Tecnico Ing. Gabriele Andrighetti e della responsabile del Servizio Geologico Dott.ssa Alceste Zecchi per la collaborazione e per aver messo a disposizione i dati delle indagini.

Si ringraziano inoltre i tecnici dell'Istituto Sperimentale Modelli Geotecnici ISMGEO (già ISMES Geotecnica) per l'attenzione prestata nell'esecuzione delle prove in sito e di laboratorio.

Bibliografia

- ANDRUS R.D., PIRATHEEPAN P., HSEIN JUANG C. (2001) – *Shear wave velocity-penetration resistance correlation for ground shaking and liquefaction hazards assessment*. USGS-Grant-01HQGR0007.
- ANDRUS R.D., ZHANG J., ELLIS B.S., HSEIN JUANG C. (2003) – *Guide for estimating the dynamic properties of South Carolina soils for ground response analysis*. Rep. No. FHWA-SC-03-07, South Carolina Department of Transportation.
- BALDI G., BELLOTTI R., GHIONNA V.N., JAMIOLKOWSKI M., LO PRESTI D.C.F. (1989) – *Modulus of sand from CPT and DMT*. Proc. 12th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, vol. I, pp. 165-170, Rio De Janeiro, Balkema, Rotterdam.
- DELIBERA REGIONALE 1677/2005 – *Prime indicazioni applicative in merito al decreto ministeriale 14 settembre 2005*.
- D.M. 14/09/2005 – *Norme tecniche per le costruzioni*.
- FAHEY M. (1998) – *Deformation and in situ stress measurement*. Theme Lecture, Geotechnical Site Characterisation: Proc. 1st International Conference on Site Characterisation (ISC '98), Atlanta, Georgia, vol. I, pp. 49-68, Balkema, Rotterdam.
- FAHEY M. (2001) – *Soil stiffness values for foundation settlement analysis*. Proc. Pre-failure Deformation characteristics of Geomaterials, (Eds. Jamiolkowsky, Lancellotta and Lo Presti). Swets & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 075 2.
- FIORAVANTE V. (2000) – *Anisotropy of small strain stiffness of Ticino and Kenya sand from seismic wave propagation measured in triaxial testing*. Soils and Foundations, vol. XL, n. 4, pp. 129-142.
- FIORAVANTE V. (2004) – *Session Report. Enhanced characterization by combined in-situ testing*. Proc. 2nd International Site Characterization Conference ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, (Eds. Viana da Fonseca and Mayne). ISBN 90 5966 009 9, pp. 1585-1596.
- HOULSBY G.T. (2001) – *In situ tests and the pre-failure deformation behaviour of soils*. Proc. Pre-failure Deformation characteristics of Geomaterials, (Eds. Jamiolkowsky, Lancellotta and Lo Presti) Swets & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 075 2.
- HEGAZY A.Y., MAYNE P.W. (1995) – *Statistical correlations between V_s and cone penetration data for different soil types*. Proc. CPT '95, pp. 173-178.
- JAMIOLKOWSKI M., LO PRESTI D.C.F., MANASSERO M. (2003) – *Evaluation of relative density and shear strength from CPT and DMT*. ASCE, GSP, n. 119, pp. 201-238.
- MADIAI C., SIMONI G. (2002) – *Correlazioni V_s - q_c per alcuni terreni dell'alta Val Tiberina*. Atti dell'Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica IARG2002, Napoli.
- MADIAI C., SIMONI G. (2004) – *Shear wave velocity-penetration resistance correlation for Holocene and Pleistocene soils of an area in central Italy*. Proc. International Site Characterization Conference ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, (Eds. Viana da Fonseca and Mayne) ISBN 90 5966 009 9.
- MAYNE P.W., RIX G.J. (1995) – *Correlation between shear wave velocity and cone tip resistance in natural clays*. Soils & Foundations, vol. XXXV, n. 2, pp. 107-110.
- O.P.C.M. n. 3274 (2003) – *Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica*.
- PIRATHEEPAN P. (2002) – *Correlations between shear wave velocity and penetration resistance*. M.S. Thesis, Clemson University, Clemson, South Carolina.
- RIX G.J., STOKOE K.H. (1991) – *Correlations of initial Tangent Modulus and Cone Penetration Resistance*. Proc. International Symposium on Calibration Chamber Testing, A.B. Huang, Ed., Elsevier Publishing, New York, pp. 351-362.
- ROBERTSON P.K. (1990) – *Soil classification using the cone penetration testing*. Canadian Geotechnical Journal, 27 n. 1, pp. 151-158.

SCHNEIDER J.A., MCGILLIVRAY A.V., MAYNE P.W. (2004) – *Evaluation of SCPTU intra-correlations at sand sites in the Lower Mississippi River Valley, USA*. Proc. 2nd International Site Characterization Conference ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, (Eds. Viana da Fonseca and Mayne) ISBN 90 5966 009 9, pp. 1003-1010.

Evaluating shear wave velocity using cone resistance for alluvial deposits of the Ferrara region

Abstract

The purpose of this paper is to provide some empirical relationships to estimate shear wave velocity, V_S , from cone penetration resistance q_c measured by Cone Penetration Tests. The correlations V_S - q_c , calibrated for the representative alluvial

soil of the Ferrara region, can be used when direct measures of the shear wave velocity are unavailable.

The Geotechnical Group of the Engineering Department of the Ferrara University is undertaking a general study of seismic local amplification on behalf of the local government of Ferrara Provincial Administration, in order to modify the land planning and mitigate the seismic effects.

A widespread geotechnical investigation survey was recently carried out for the project of the “navigable channel”, including sounding with undisturbed sampling, laboratory tests, piezocone and down-hole tests with seismic cone, which produced a well documented geotechnical characterization of many sites. The data were analysed to validate some well known empirical correlations proposed in the geotechnical literature which enable the evaluation of V_S from q_c .

With the aim of obtaining relationships as reliable as possible, the available data were carefully selected. Furthermore to reduce the uncertainties due to the alluvial sedimentary environment, the selected data were subdivided into three families concerning clay, silt and sand; for each of these the empirical coefficients of the correlations were assessed. The predictive capacity of the obtained correlations was finally validated by comparing V_S values estimated by the correlations with those measured with down-hole tests in four of the investigated sites.