

## **CORRELAZIONI $V_s$ - $q_c$ PER ALCUNI TERRENI DELL'ALTA VAL TIBERINA**

Claudia Madaia e Giacomo Simoni

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Firenze*

*e-mail: [clau@dicea.unifi.it](mailto:clau@dicea.unifi.it); [gsimoni@dicea.unifi.it](mailto:gsimoni@dicea.unifi.it)*

### **Abstract**

Vengono descritti i passi e i risultati di una procedura per pervenire alla definizione di correlazioni di validità regionale, distinte per terreni prevalentemente coesivi o incoerenti, per la stima indiretta del modulo di taglio iniziale nei depositi quaternari dell'alta Valtiberina umbra a partire da prove penetrometriche statiche a punta elettrica. Lo studio è stato finalizzato all'analisi della risposta sismica locale mediante modelli 2D in alcuni centri abitati minori della valle del Tevere dove, oltre a profili di  $V_s$ , acquisiti direttamente mediante prove geofisiche in foro, erano disponibili i risultati di numerose prove penetrometriche statiche, eseguite nell'ambito di una vasta campagna di indagini.

### **Introduzione**

Per l'analisi della risposta sismica mediante modelli 2D in alcuni siti dell'alta Valtiberina umbra (Pergalani *et al.*, 2002), si è resa necessaria la stima della rigidità iniziale del terreno nelle zone non direttamente esplorate con prove geofisiche (downhole, DH, o crosshole, CH). Poiché dall'esame dei dati esistenti è risultato che le prove CPT sono tra le prove geotecniche più diffuse nell'area, è stata considerata la possibilità di utilizzare i risultati di tali prove per la caratterizzazione dei depositi nelle zone non direttamente investigate con prove DH o CH. A tal fine sono state studiate delle correlazioni empiriche di validità regionale tra la velocità delle onde S,  $V_s$ , e la resistenza alla punta,  $q_c$ , da prove CPT, derivandole dalle informazioni acquisite in un'estesa campagna di indagini geotecniche che hanno fornito importanti elementi di conoscenza sulle formazioni geologiche presenti, sulla loro diffusione e sulle loro caratteristiche. Da tali indagini, risulta che nell'area le formazioni superficiali più diffuse sono costituite dai depositi olocenici e pleistocenici, di caratteristiche meccaniche generalmente medio-basse, spesso caratterizzate da una fitta alternanza di strati incoerenti e coesivi. I materiali alluvionali olocenici rivelano maggiore eterogeneità rispetto a quelli pleistocenici, che risultano prevalentemente coesivi. È stata perciò ravvisata inizialmente l'opportunità di trovare delle correlazioni distinte per i materiali olocenici e pleistocenici, distinguendo, per ciascuna delle due formazioni, quelli a prevalente componente incoerente o coesiva. È ben noto, infatti, che il vantaggio delle correlazioni regionali, rispetto a quelle valide in generale per tutti i terreni, è che potendo essere rapportate alle caratteristiche specifiche del contesto geotecnico, possono fornire stime molto più precise ed accurate. Ciò comporta, tuttavia, una selezione molto mirata dei dati che si utilizzano ed anche una chiarezza sugli obiettivi e sulle finalità del loro impiego.

## Criteri di selezione e classificazione dei dati

Anche se i livelli deformativi indotti nel terreno dalle prove CPT e dalle prove geofisiche per la misura di  $V_S$  sono molto diversi tra loro, è altresì noto che le due grandezze,  $q_c$  e  $V_S$ , sono influenzate dagli stessi parametri e tra loro correlate (Mayne & Rix, 1995). Per questo motivo, negli ultimi anni è andato crescendo il numero delle correlazioni tra  $q_c$  e  $V_S$  proposte da vari autori.

Nel caso specifico, per ottenere delle espressioni caratterizzate da un più alto coefficiente di determinazione, è stata impiegata una particolare cura selezione dei dati.

Per la classificazione dei terreni in corrispondenza delle verticali esplorate con le prove CPT è stata utilizzata la carta di Robertson (1990)(figura 1). È interessante osservare che, in accordo con i risultati ottenuti dalle analisi di laboratorio e in sito condotte su tali materiali (Crespellani *et al.*, 2002), i depositi di origine alluvionale (simbolo vuoto in figura) risultano più eterogenei rispetto ai materiali di origine pleistocenica (simbolo pieno in figura) e presentano mediamente un grado di sovraconsolidazione maggiore.

I criteri generali adottati per la selezione dei dati sono stati i seguenti: 1) sono stati esclusi dalle elaborazioni i dati relativi ai due metri di terreno più superficiale, spesso costituito da materiale di riporto o vegetale; 2) per la determinazione di  $V_S$  da prove CH e DH (a due ricevitori) sono state considerate solo le registrazioni in cui i tempi di arrivo delle onde di taglio fossero facilmente individuabili; 3) i valori di  $Q$  e di  $F$  (determinati ogni 5 cm) sono stati mediati per ogni metro di profondità, escludendo gli outliers, allo scopo di classificare il terreno ad intervalli di un metro di spessore; 4) sono stati esclusi dalle elaborazioni i dati per i quali la classificazione effettuata mediante la carta di Robertson risultava in disaccordo con la quella determinata in maniera diretta nel sondaggio vicino.

## Correlazioni proposte

In una prima fase della ricerca i dati sono stati analizzati distinguendo i materiali di origine alluvionale dai materiali di origine pleistocenica e i materiali “incoerenti” (per i quali i punti rappresentativi delle CPT ricadono nelle regioni 5, 6 e 7 della carta di Robertson) da quelli “coesivi” (per i quali i punti rappresentativi delle CPT ricadono nelle regioni 2, 3 e 4 della carta di Robertson). Avendo osservato nelle verticali indagate una sostanziale indipendenza dei parametri geotecnici dalla profondità, per entrambe le formazioni, si è ritenuto opportuno adottare, tra le correlazioni più frequentemente utilizzate in letteratura in passato (Jamiolkowski *et al.*, 1985; Baldi *et al.*, 1989; Rix & Stokoe, 1991), una semplice relazione del tipo:

$$V_S = \alpha \cdot q_c^\beta \quad (1)$$

I coefficienti  $a$  e  $b$  della regressione, per i diversi materiali, sono riportati nella tabella 1, nella quale è possibile osservare che le regressioni determinate a prescindere dall'origine geologica, mantenendo la sola distinzione tra materiali coesivi e materiali incoerenti, hanno mostrato il miglior adattamento ai dati sperimentali. Il confronto con alcune regressioni proposte in letteratura, dopo aver ricavato il valore di  $G_0$  dalla relazione  $G_0 = r V_S^2$ , è mostrato in figura 2. Si osserva che l'andamento nel piano bilogaritmico delle funzioni  $G_0(q_c)$  trovate per i materiali prevalentemente coesivi (linea 1a in figura) e incoerenti (linea 1b in figura), è all'incirca parallelo a quello delle relazioni proposte da Simonini & Cola (2000) e da Imai & Tonouchi (1982), nella versione modificata da

Bouckovalas *et al.* (1989). Le regressioni ottenute da Bouckovalas *et al.* (1989) e da Mayne *et al.*(1993), rispettivamente per argille soffici della costa greca e per differenti tipi di argille di diversi siti del mondo, hanno invece una pendenza maggiore.

È stata successivamente analizzata l'applicabilità di correlazioni che impiegano valori corretti e/o normalizzati di  $V_s$  e  $q_c$  (Baldi *et al.*, 1989; Andrus *et al.*, 2001), utilizzando una relazione del tipo:

$$V_{SI} = a \cdot (q_{cIN})^b \quad (2)$$

con  $V_{SI} = V_s (p_a/s'_v)^{0.25}$   $q_{cIN} = (q_c/p_a) (p_a/s'_v)^{0.5}$  ( $p_a$  valore della pressione atmosferica di riferimento, espressa nelle unità di misura di  $q_c$  e  $s'_v$ ).

I coefficienti  $a$  e  $b$  della regressione, per i diversi materiali, sono riportati nella tabella 1, nella quale è possibile osservare che solo nel caso dei materiali incoerenti pleistocenici il coefficiente di correlazione è maggiore rispetto a quello della relazione (1).

Nella figura 3 è riportato il confronto tra i valori di  $V_s$  misurati con prove sismiche in foro e quelli stimati con le relazioni (1) e (2) a partire dai valori  $q_c$  ottenuti lungo le verticali poste in prossimità dei fori di sondaggio. È stato anche confrontato il profilo di  $V_s$  determinato mediante una prova CH a due fori con i profili ottenuti per mezzo delle due relazioni proposte a partire dai risultati di una prova CPT adiacente. I risultati, illustrati nella figura 4, mostrano un sostanziale buon accordo lungo tutta la verticale tra i valori di  $V_s$  misurati e stimati. Tuttavia, la stessa figura evidenzia anche che, essendo  $q_c$  un parametro puntuale, i risultati della stima possono diventare scarsamente attendibili se i valori della resistenza di punta sono rappresentativi di una condizione strettamente locale.

Tabella 1. Coefficienti  $a$  e  $b$  della regressione (1),  $a$  e  $b$  della regressione (2)

materiale	origine	n. dati	$a$	$b$	$r^2$	$a$	$b$	$r^2$
coesivi	alluvionale	25	211.2	0.199	0.830	145.0	0.181	0.861
	pleistocenica	21	193.0	0.315	0.810	97.2	0.281	0.726
	all. e pleist.	46	211.2	0.231	0.871	146.0	0.166	0.682
incoerenti	alluvionale	18	241.0	0.235	0.721	123.9	0.251	0.654
	pleistocenica	12	229.7	0.245	0.631	82.5	0.357	0.909
	all. e pleist.	30	229.7	0.253	0.812	112.5	0.274	0.780

## Bibliografia

- Andrus, D., Piratheepan, P. and C. Hsein Juang (2001), "Shear wave velocity – penetration resistance correlation for ground shaking and liquefaction hazards assessment", *USGS Grant 01HQGR0007*, <http://erp-web.er.usgs.gov/reports/annsum/vol43/pt/01g0007.pdf>.
- Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V.N., Jamiolkowski, M. and D.C.F. Lo Presti (1989), "Modulus of sand from CPT and DMT", *Proc. 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, vol. 1, 165-170.
- Bouckovalas, G., Kalteziotis, N., Sabatakakis, N. and C. Zervogiannis (1989), " Shear wave velocity in a very soft clay – Measurement and correlation", *Proc. 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, vol. 1, 191-194.
- Crespellani, T., Madiari, C. and G. Simoni (2002), " Indagini geotecniche per la valutazione degli effetti di sito in alcuni centri dell'alta Valtiberina ", *Ingegneria Sismica*, Anno XIX, N. 1, 15-32.
- Jamiolkowski, M., Ladd, C.C., Germaine, J.T. and R. Lancellotta (1985), "New developments in field and laboratory testing", *Proc. 11<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, vol. 1, 57-152.

Mayne, P.W. and G.J. Rix (1993), “ $G_{max}$ - $q_c$  relationship for clays”, *Geot. Testing J.*, vol. 16, n. 1, 54-60.

Mayne, P.W. and G.J. Rix, (1995), “Correlation between shear wave velocity and cone tip resistance in natural clays”, *Soils and Foundations*, vol. 35, n. 2, 107-110.

Pergalani, F., Compagnoni, M. and V. Petrini (2002), “Valutazione degli effetti di sito in alcuni centri dell’alta Valtiberina umbra tramite modellazione numerica”, *Ingegneria Sismica*, Anno XIX, N. 1.

Rix, G.J. and K.H. Stokoe (1991), “Correlation on initial tangent modulus and cone penetration resistance – Calibration chamber testing”, *Proc. ISOCCT-I*, A.B. Huang, Ed. Elsevier Publishing, New York, 351-362

Robertson, P.K. (1990), “Soil Classification using the cone penetration test”, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 27, 151-158.

Simonini, P. and S. Cola (2000), “Use of piezocone to predict maximum stiffness of venetian soils”, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, April, 378-382.

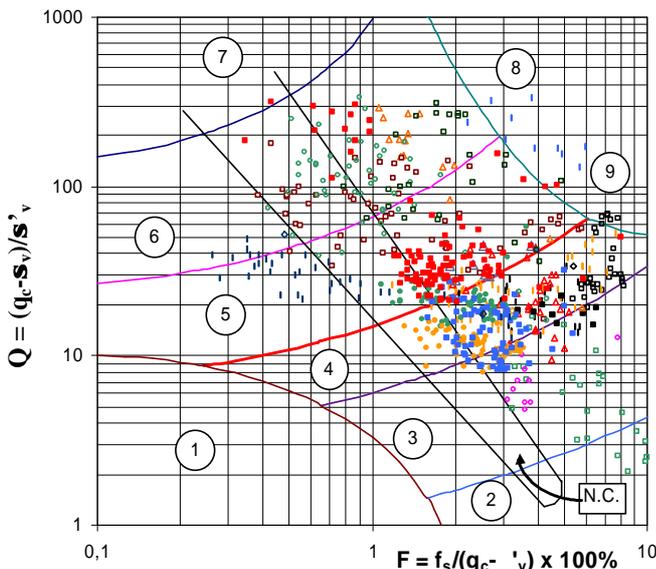


Figura 1. Classificazione dei dati delle prove CPT

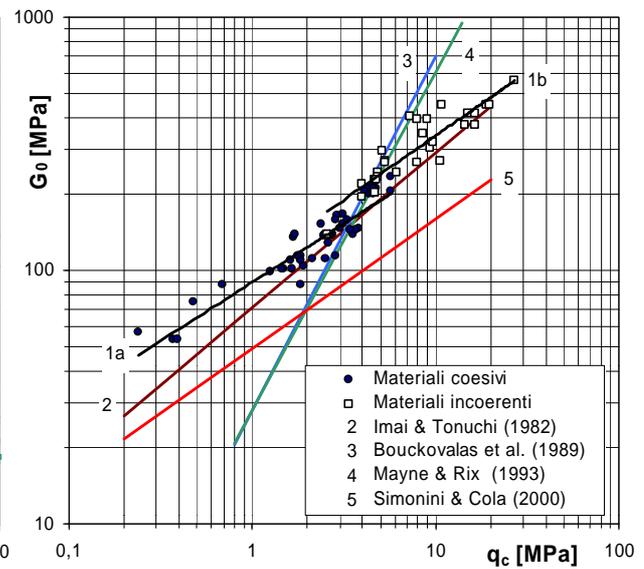


Figura 2. Regressioni ottenute e di letteratura

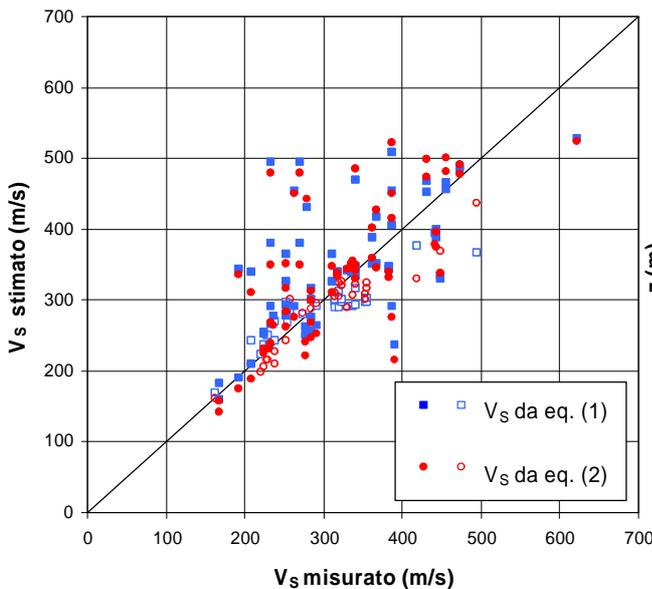


Figura 3. Valori di  $V_s$  misurati e stimati

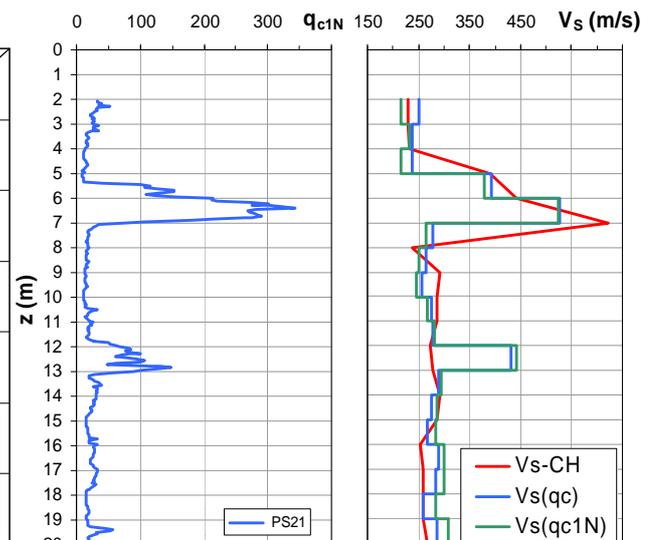


Figura 4. Profilo di  $V_s$  misurato e stimato