

Classificazione dei terreni del Mare Adriatico mediante prove penetrometriche statiche

F. PELLI*, M. OTTAVIANI**

SOMMARIO. In questa memoria i risultati di prove CPT e CPTU condotte in corrispondenza di 17 siti nel Mare Adriatico sono confrontati con sistemi di classificazione proposti nella letteratura per cono elettrici standard e piezoconi. Lo scopo è quello di verificare l'applicabilità di tali sistemi nel Mare Adriatico, facendo anche riferimento ai numerosi dati di laboratorio disponibili per i terreni oggetto di studio. La notevole profondità delle prove costituisce un elemento di interesse, visto che gran parte dei dati in base ai quali sono stati sviluppati i sistemi di classificazione sono riferiti a profondità inferiori ai 30 metri, tipiche di prove condotte a terra.

In questo studio sono presi in considerazione due sistemi di classificazione: un sistema di classificazione semplificato, dove i parametri registrati durante la penetrazione vengono utilizzati direttamente, e un sistema di classificazione normalizzato, dove i parametri di penetrazione sono normalizzati tenendo conto dello stato tensionale in sito e dove vengono considerate anche le sovrappressioni interstiziali misurate durante la penetrazione di piezoconi.

Il sistema semplificato risulta non soddisfacente per i terreni coesivi profondi. I sistemi normalizzati risultano più affidabili; in alcuni casi, tuttavia, i terreni coesivi tendono a collocarsi in aree proprie dei terreni organici e delle torbe che non sembrano appropriate alle formazioni del Mare Adriatico. Appaiono promettenti i sistemi di classificazione basati sulle pressioni interstiziali misurate durante la penetrazione di piezoconi.

1. Introduzione

Uno degli obiettivi fondamentali di ogni indagine geotecnica consiste nella determinazione delle caratteristiche stratigrafiche dei terreni. Da questo punto di vista i penetrometri statici con punta conica (CPT) e i piezoconi (CPTU) possono fornire informazioni di grande interesse, in quanto consentono di ottenere profili praticamente continui, evidenziando la presenza di interstrati sottili [BALIGH *et al.*, 1980] e fornendo parametri la cui combinazione può aiutare a definire la tipologia del terreno attraversato.

A partire dagli anni settanta, sono stati elaborati vari sistemi di classificazione dei terreni mediante interpretazione dei CPT e CPTU [SCHMERTMANN, 1978; SEARLE, 1979; ROBERTSON *et al.*, 1986; ROBERTSON, 1990]. Tali sistemi sono di tipo empirico, e richiedono verifiche su base locale, realizzabili mediante confronto dei dati penetrometrici con le caratteristiche dei terreni ottenute mediante osservazione diretta dei campioni e prove di laboratorio.

In questa memoria i risultati di prove CPT e CPTU condotte in corrispondenza di 17 siti nel Mare Adriatico sono confrontati con i sistemi di classificazione sviluppati da ROBERTSON *et al.* [1986] e ROBERTSON [1990] per cono elettrici standard e piezoconi. Lo scopo è quello di verificare l'applicabilità di tali sistemi nel Mare Adriatico, sulla base dei numerosi

dati di laboratorio disponibili per i terreni oggetto di studio.

Una delle caratteristiche delle prove penetrometriche a mare è l'elevata profondità a cui sono frequentemente condotte. In particolare, le prove condotte nel Mare Adriatico raggiungono profondità di 120 metri sotto il livello di fondale, dove sono presenti formazioni limo argillose normalmente consolidate. Questo costituisce un elemento di interesse visto che gran parte dei dati in base ai quali sono stati sviluppati i sistemi di classificazione sono riferiti a profondità inferiori ai 30 metri, tipiche di prove condotte a terra.

Nel seguito di questa memoria sono sintetizzate le caratteristiche principali dei terreni oggetto di studio e sono descritti i sistemi di classificazione utilizzati. I dati penetrometrici relativi al Mare Adriatico sono quindi valutati confrontando le caratteristiche note dei terreni a quelle dedotte indirettamente mediante tali sistemi.

Dettagli sull'interpretazione dei dati penetrometrici, sui criteri di confronto con i campioni e sulle procedure di prova a mare sono forniti da PELLI e OTTAVIANI [1992].

2. Descrizione dei terreni

Le caratteristiche stratigrafiche della zona del Mare Adriatico in cui sono collocati i siti oggetto di studio sono sintetizzate da PELLI e OTTAVIANI [1992], che riportano anche, a titolo di esempio, la stratigrafia e l'andamento di q_c per uno dei siti.

* Dott. Ing. Fabrizio PELLI, Project Manager, D'Appolonia S.p.A., Genova.

** Prof. Ing. Mario OTTAVIANI, Straordinario di Geotecnica nella Difesa del Territorio, Università «La Sapienza», Roma.

Le formazioni caratterizzanti la zona di interesse sono descritte nel seguito in ordine di profondità crescente:

- o Formazione A: sedimenti superficiali recenti (olocenici-attuali) costituiti da argilla, argilla limosa e limi argillosi normalconsolidati di spessore limitato;
- o Formazione B: terreni di ambiente continentale terrestre, lacustre e fluviopalustre, attribuibili al periodo della glaciazione Wurmiana, composti da argille e argille limose sovraconsolidate ($OCR = 1 \div 10$), con un indice di plasticità variabile tra 15 ed oltre 55, e con uno spessore medio di circa 50 metri;
- o Formazione C: formazione di ambiente marino, precedente la glaciazione Wurmiana, spesso caratterizzata nella parte superiore da terreni sabbiosi sovrastanti limi argillosi prevalentemente normalconsolidati, con un indice di plasticità generalmente compreso tra 7 e 35.

I terreni sabbiosi sono costituiti prevalentemente da sabbie fini e sabbie fini limose. In alcuni siti il contenuto in fini (passante al vaglio #200) è compreso tra il 5 e il 20 per cento, mentre in altri raggiunge valori massimi superiori al 40 per cento. Due curve granulometriche tipiche dei terreni sabbio-limosi dell'Adriatico sono riportate nella Figura 1. Visto il contenuto in carbonati che può raggiungere il 50 per cento, questi terreni sono definibili come silicei e calcareo-silicei secondo la classificazione di CLARK e WALKER [1977]. Sono presenti inoltre frammenti conchigliari, la cui quantità varia da sito a sito.

I terreni coesivi sono generalmente classificabili, in base alle loro caratteristiche di plasticità, come argille inorganiche di bassa e media plasticità (CL) o argille inorganiche di elevata plasticità (CH). Due curve granulometriche tipiche delle argille limose e dei limi argillosi sono presentate nella Figura 1. In alcuni siti sono state rilevate tracce di materiali organici e frammenti conchigliari.

I dati utilizzati in questo studio si riferiscono alla zona meno superficiale della Formazione A ed alle argille limose (AL) della Formazione B, alle sabbie (S-SL) e ai limi argillosi (LA) della Formazione C fino ad una profondità di circa 120 metri.

3. Sistemi di classificazione mediante CPT e CPTU

Nelle due sezioni che seguono vengono descritti i due sistemi di classificazione utilizzati per confronto nel corso di questo studio. I dati di piezocono riportati, a titolo di esempio, nelle Figure 2 e 3 sono relativi ad uno dei siti analizzati.

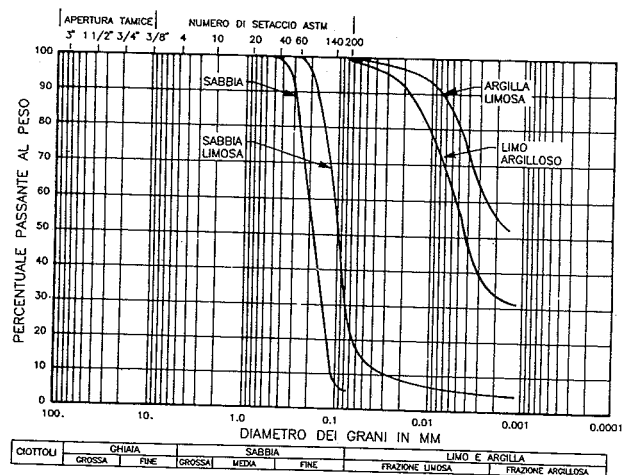


Fig. 1 - Curve granulometriche tipiche.
Fig. 1 - Typical grain size curves.

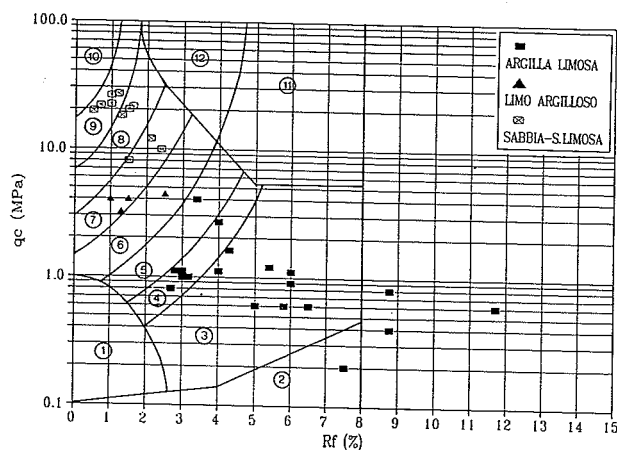


Fig. 2 - Sito 1; sistema di classificazione semplificato.
Fig. 2 - Site 1; simplified classification system.

3.1. Sistema di classificazione semplificato

Il più semplice sistema di classificazione dei terreni mediante CPT si basa sui valori di resistenza alla punta q_c e sul rapporto di attrito laterale R_f , definito come segue:

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \times 100\% \quad (1)$$

dove f_s è l'attrito laterale misurato sul manicotto del penetrometro. Sistemi di classificazione di questo tipo non richiedono la misura delle sovrappressioni interstiziali che si sviluppano durante la penetrazione.

Il sistema di classificazione riportato in Figura 2 è stato proposto da ROBERTSON *et al.* [1986] e ROBERTSON [1990], ed è applicabile a cono elettrici standard, del tipo correntemente usato per le campagne di indagine a mare. Tale sistema non è in generale

utilizzabile per conici di tipo meccanico, per i quali è necessario fare riferimento a correlazioni diverse [SCHMERTMANN, 1978; SEARLE, 1979].

Nella classificazione di Figura 2 sono identificate dodici diverse zone, corrispondenti alle dodici classi di terreno descritte nella Tabella I. Scendendo diagonalmente dalla Zona 10 (in alto a sinistra del diagramma) alla Zona 2 (in basso al centro) si rilevano tipologie di terreno con granulometrie e permeabilità decrescenti. Nei terreni appartenenti a classi elevate (da 7 a 10) la penetrazione del cono avviene senza sviluppo di pressioni interstiziali rilevanti, mentre sovrappressioni tendono a svilupparsi nei terreni appartenenti alle classi più basse (da 2 a 5), che si comportano in modo non drenato.

La Zona 1, corrispondente a bassi valori di q_c e R_f , è attribuita a terreni fini sensitivi. In questo caso, ad una bassa resistenza alla punta attribuibile al comportamento non drenato del terreno, si associa una sostanziale perdita di resistenza del terreno rimaneggiato con conseguente bassa aderenza lungo il manicotto. Al contrario le Zone 11 e 12, collocate nella parte alta del diagramma, sono applicabili a terreni sovraconsolidati o cementati.

Il metodo di classificazione basato sui parametri q_c e R_f presenta il vantaggio di essere semplice. D'altro canto, la sua limitazione più evidente consiste nel fatto che l'effetto della profondità a cui è stata effettuata la prova viene completamente trascurato. ROBERTSON [1990] ne sconsiglia l'uso a profondità sensibilmente superiori ai 30 metri, in quanto i dati utilizzati per lo sviluppo del metodo sono tutti relativamente superficiali. Si noti che le profondità considerate in questo studio raggiungono i 120 metri sotto il livello di fondale, e pertanto gli effetti dello stato tensionale in sito sui parametri utilizzati per la classificazione dei terreni possono essere rilevanti.

Confrontando le definizioni riportate nella Tabella I con le caratteristiche dei terreni del Mare Adria-

tico, sintetizzate nel capitolo precedente, si può individuare una classe di appartenenza appropriata per ciascuna formazione. Le sabbie-sabbie limose dovrebbero cadere nelle zone a comportamento drenato relative a terreni di granulometria fine, quali le Zone 7 e 8. I terreni coesivi dovrebbero trovarsi prevalentemente nelle Zone 3 e 4, con possibilità di cadere anche nella Zona 5.

Il comportamento drenato dei terreni sabbio-limosi e non drenato delle formazioni coesive è confermato anche dai valori di sovrappressione interstiziale misurati mediante piezocono.

3.2. Sistema di classificazione normalizzato

Il sistema di classificazione riportato nella Figura 3 è stato sviluppato da ROBERTSON [1990] in base ai risultati di prove penetrometriche effettuate con piezocono. Le zone o classi di terreno riportate sui diagrammi sono descritte nella Tabella II. I parametri

Tabella I - Sistema di classificazione semplificato [ROBERTSON et al., 1986].

SISTEMA DI CLASSIFICAZIONE SEMPLIFICATO	
ZONA	TIPO DI TERRENO
1	terreno fine sensitivo
2	materiale organico
3	argilla
4	argilla limosa - argilla
5	limo argilloso - argilla limosa
6	limo sabbioso - limo argilloso
7	sabbia limosa - limo sabbioso
8	sabbia - sabbia limosa
9	sabbia
10	sabbia ghiaiosa - sabbia
11	terreno fine molto consistente*
12	sabbia - sabbia argillosa*

* sovraconsolidato o cementato.

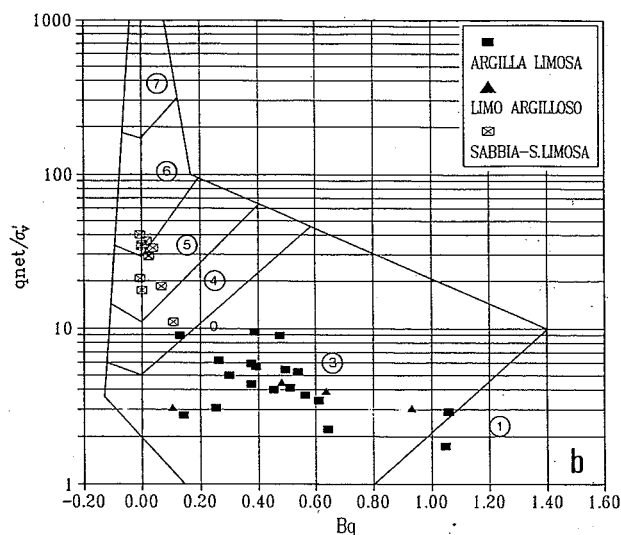
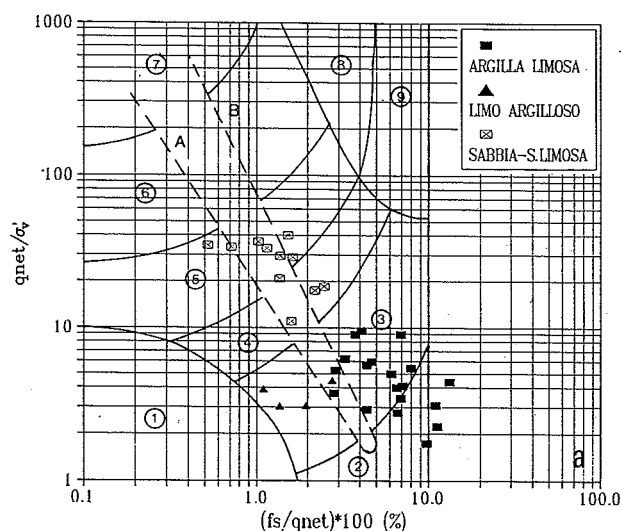


Fig. 3 - Sito 1; sistema di classificazione normalizzato.
Fig. 3 - Site 1; normalized classification system.

Tabella II - Sistema di classificazione normalizzato [ROBERTSON, 1990].

SISTEMA DI CLASSIFICAZIONE NORMALIZZATO	
ZONA	TIPO DI TERRENO
1	terreno fine, sensitivo
2	terreni organici - torbe
3	argilla - argilla limosa
4	limo argilloso - argilla limosa
5	sabbia limosa - limo sabbioso
6	sabbia - sabbia limosa
7	sabbia ghiaiosa - sabbia
8	sabbia molto consistente - sabbia argillosa*
9	terreno fine molto consistente*

* fortemente sovraconsolidato o cementato.

normalizzati riportati sugli assi dei diagrammi sono la resistenza alla punta normalizzata, Q_{ct} , il rapporto d'attrito laterale normalizzato F_R , e il parametro delle sovrappressioni interstiziali B_q . La resistenza alla punta normalizzata Q_{ct} è definita come segue:

$$Q_{ct} = \frac{q_{ct} - \sigma_{vo}}{\sigma_{vo}'} = \frac{q_{net}}{\sigma_{vo}'} \quad (2)$$

dove σ_{vo} e σ_{vo}' sono le tensioni verticali totali ed efficaci rispettivamente, e q_{ct} è il valore corretto della resistenza alla punta ottenuto nel modo seguente [LUNNE *et al.*, 1985]:

$$q_{ct} = q_c + u_o + u(1 - \alpha)k_c \quad (3)$$

dove u_o è la pressione idrostatica a fondo foro, u è la pressione misurata dal piezocono, e k_c e α sono due parametri correttivi applicati alle misure piezometriche [PELLI e OTTAVIANI, 1992]. La correzione ha lo scopo di tenere conto delle sovrappressioni interstiziali che si sviluppano durante la penetrazione e della procedura di prova.

La normalizzazione nei confronti di σ_{vo}' consente di tenere conto della profondità a cui è effettuata la prova. Si noti che, per quanto l'influenza delle tensioni orizzontali sulla resistenza alla punta del cono sia dimostrata sperimentalmente [HOULSBY e HITCHMAN, 1988; HOULSBY e WROTH, 1989] nonché teoricamente [TEH e HOULSBY, 1988; 1991], la difficoltà di conoscere lo stato tensionale orizzontale in sito non consente l'uso di tale parametro nell'ambito delle correlazioni empiriche correnti.

Il sistema di classificazione riportato nella Figura 3a si basa sulla resistenza alla punta normalizzata, descritta sopra, e sul rapporto d'attrito laterale normalizzato F_R definito come segue:

$$F_R = \frac{f_s}{q_{ct} - \sigma_{vo}} \times 100\% = \frac{f_s}{q_{net}} \times 100\% \quad (4)$$

Questo parametro è del tutto analogo al rapporto di attrito laterale R_f , riferito però al valore corretto della resistenza alla punta.

In prossimità della zona delimitata dalle linee tratteggiate A e B (Figura 3a), sono collocati terreni normalmente consolidati. Terreni sovraconsolidati, di non recente deposizione o cementati si collocano al di sopra e a destra di tale zona, mentre valori posizionati al di sotto delle linee A e B indicano terreni a sensibilità crescente man mano che ci si avvicina all'angolo inferiore sinistro del grafico. I valori di resistenza alla punta normalizzata tendono ad aumentare al crescere della resistenza del terreno attraversato ed al decrescere della sua compressibilità.

Il sistema di classificazione riportato in Figura 3b si basa sulla resistenza alla punta normalizzata e sul parametro B_q , che esprime in forma adimensionale la sovrappressione interstiziale misurata nel corso di prove CPTU [ROBERTSON *et al.*, 1986]:

$$B_q = \frac{\Delta u}{q_{ct} - \sigma_{vo}} \quad (5)$$

dove Δu è la sovrappressione interstiziale misurata immediatamente a tergo del cono.

Si noti che per terreni sabbiosi e ghiaiosi, caratterizzati da valori elevati della resistenza alla punta e da elevata permeabilità, le sovrappressioni interstiziali misurate sono limitate, spesso praticamente nulle. Per terreni limosi e argillosi sono invece possibili sovrappressioni rilevanti, particolarmente in formazioni normalmente consolidate o sensitive.

Confrontando le definizioni riportate nella Tabella II con le caratteristiche dei terreni del Mare Adriatico come verificate in laboratorio, si possono individuare le Zone 5 e 6 come le più appropriate per i terreni sabbiosi e sabbio-limosi, mentre i terreni argillo-limosi e limo-argillosi dovrebbero collocarsi nelle Zone 3 e 4.

4. Analisi dei dati

4.1. Sistema di classificazione semplificato

Nella Figura 4 sono riportati, per confronto con il sistema di classificazione semplificato, tutti i dati disponibili per i siti analizzati. I valori di q_c utilizzati per il confronto sono stati selezionati in corrispondenza o in prossimità dei punti di campionamento indisturbato. I criteri seguiti per il confronto di q_c con i campioni di terreno sono descritti da PELLI e OTTAVIANI [1992]. Nella Figura 4a sono riportati i dati relativi alle sabbie, mentre nelle Figure 4b e 4c sono riportati i dati relativi alle formazioni argillo limosa (AL) e limo argillosa (LA).

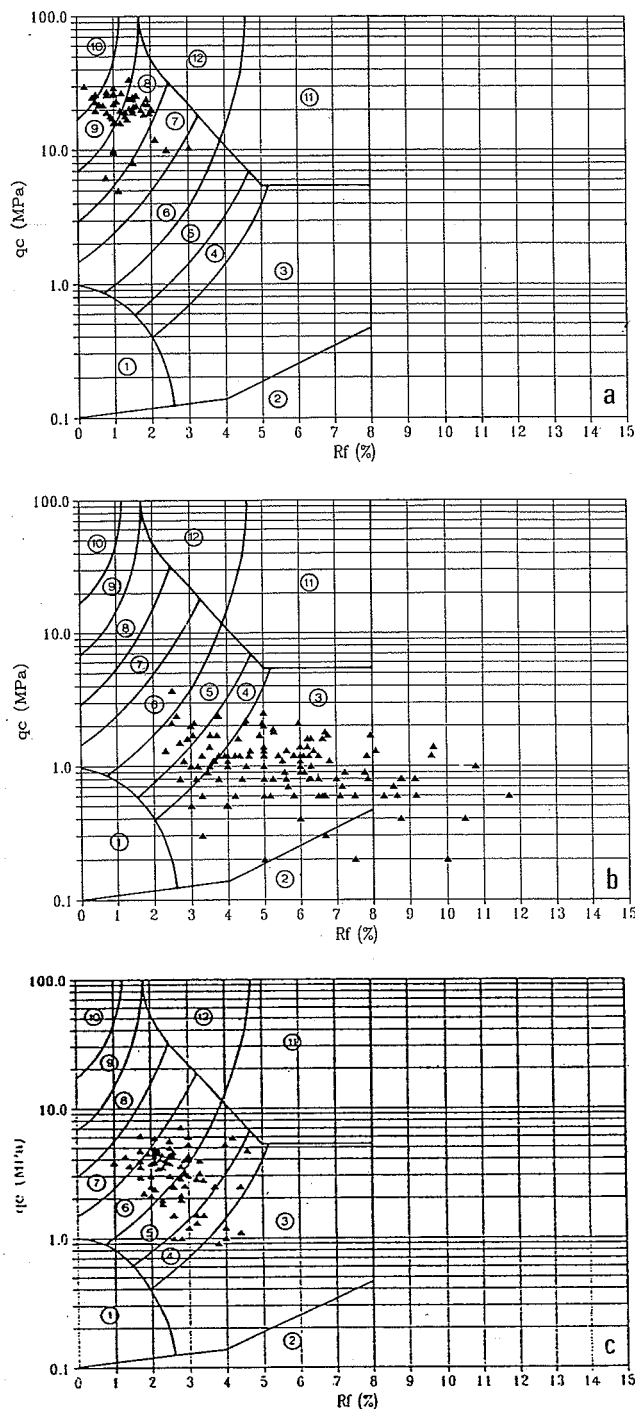


Fig. 4 - Tutti i siti; sistema di classificazione semplificato, a) sabbie e sabbie limose, b) argille limose, c) limi argillosi.

Fig. 4 - All sites; simplified classification system, a) sand and silty sand, b) silty clay, c) clayey silt.

Le sabbie occupano principalmente le Zone 8 (sabbia-sabbia limosa) e 9 (sabbia). Nonostante si prevedesse una collocazione più bassa (Zone 7 e 8), queste due classi si adattano bene alle caratteristiche delle sabbie del Mare Adriatico.

I valori registrati nelle argille limose (AL) sono contenuti principalmente nelle Zone 3, 4 e 5, e si estendono verso destra con valori di R_f superiori a quelli massimi considerati da ROBERTSON *et al.* [1986]

nel loro sistema di classificazione. I dati sono considerevolmente dispersi, con valori di R_f variabili tra il 2.5 per cento ad oltre il 9 per cento. Le caratteristiche dei terreni in sito sono ben rappresentate dalle Zone 3 (argille), 4 (argille-argille limose) e 5 (argille limose-limi argillose), e i dati si mantengono nell'area tipica dei terreni a comportamento non drenato.

Per la formazione limo-argillosa (LA) il sistema risulta invece inadeguato. I dati riportati sul diagramma (Figura 4c) interessano zone variabili tra la 3 (argille) e la 7 (sabbia limosa-limo sabbioso). In realtà questa formazione è rappresentata adeguatamente dalle classi più basse a comportamento non drenato, essendo caratterizzata da un contenuto in minerali argillosi rilevante e da una non trascurabile plasticità. Il comportamento non drenato di questa formazione durante la penetrazione del cono è del resto testimoniato dalle elevate sovrappressioni interstiziali misurate nel corso di misure col piezocono. Si noti che la formazione LA è la più profonda, ed una sovrastima della classe di appartenenza rientra nella non applicabilità del sistema di classificazione semplificato, come descritto in una sezione precedente.

4.2. Sistema di classificazione normalizzato basato su F_R

Nella Figura 5 i dati relativi a tutti i siti sono confrontati con il sistema di classificazione normalizzato, basato sul coefficiente di attrito normalizzato F_R . Poiché per 13 dei 17 siti sono disponibili dati di cono elettrico non piezometrico, i valori di resistenza alla punta corretti sono stati calcolati applicando la seguente relazione semplificata:

$$q_{net} = q_c - \sigma'_{vo} \quad (6)$$

I dati relativi alle formazioni sabbiose sono presentati nella Figura 5a. Tali valori si trovano concentrati nella Zona 5 (sabbia limosa-limo sabbioso), in corrispondenza della zona di normalconsolidazione. Confrontando le Figure 5a e 4a si nota che l'effetto della correzione non comporta variazioni rilevanti del rapporto di attrito laterale. D'altro canto è determinante l'effetto della profondità della formazione, che raggiunge valori compresi tra 50 e 100 metri. L'appartenenza alla Zona 5 corrisponde in modo ragionevole alle caratteristiche rilevate in laboratorio.

I dati della formazione argillo-limosa AL sono presentati nella Figura 5b. Tali dati cadono nella Zona 3 (argille) e nella Zona 2 (terreni organici-torbe). Inoltre, come già osservato nel sistema semplificato, alcuni punti si collocano oltre il limite destro del si-

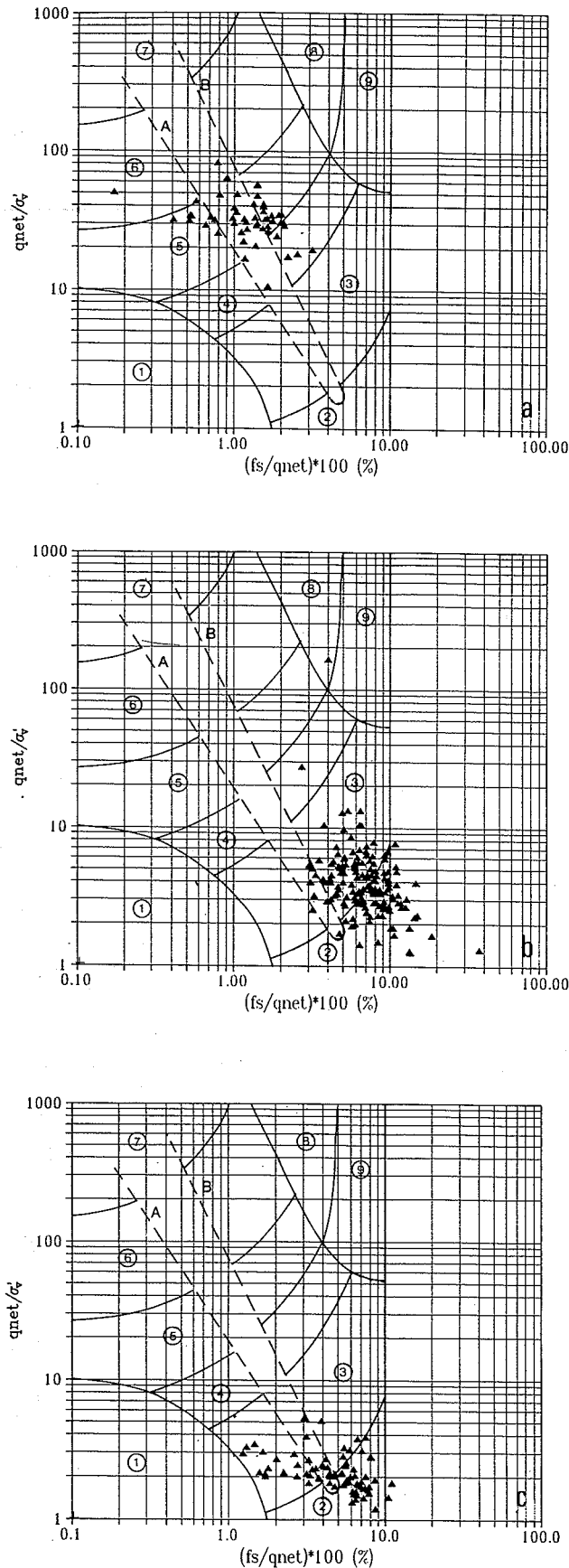


Fig. 5 - Tutti i siti; sistema di classificazione normalizzato basato sui parametri Q_{ct} e F_R , a) sabbie e sabbie limose, b) argille limose, c) limi argillosi.

Fig. 5 - All sites; normalized classification system based on Q_{ct} and F_R , a) sand and silty sand, b) silty clay, c) clayey silt.

stema di classificazione proposto da ROBERTSON [1990], con valori del rapporto di attrito laterale superiori al 10 per cento. La collocazione dei valori a destra delle linee A e B è qualitativamente coerente con le caratteristiche di sovraconsolidazione di queste argille. Inoltre la Zona 3 è senza dubbio la più adeguata a rappresentare le effettive caratteristiche di questi terreni, mentre l'interessamento della Zona 2 non sembra giustificato in quanto non si rileva la presenza di materiali organici se non sottoforma di tracce, individuate in alcuni siti.

Considerazioni analoghe sono riferibili alla formazione limo argillosa LA (Figura 5c). Questi terreni sono normalmente consolidati, e l'addensamento dei valori in prossimità della zona delimitata dalle linee A e B è congruente con tale stato. Anche in questo caso, tuttavia, molti valori si collocano al di sotto del limite tra la Zona 3 e la Zona 2. Questa tendenza sembra dovuta alla resistenza relativamente bassa di queste formazioni rilevata nel corso di prove triassiali in laboratorio [PELLI e OTTAVIANI, 1992].

4.3. Sistema di classificazione normalizzato basato su B_q

Per i quattro siti nei quali sono disponibili prove di piezocono, è possibile un confronto con il sistema di classificazione normalizzato basato su B_q (Figura 6). I valori relativi alle sabbie, riportati nella Figura 6a, sono concentrati principalmente nella metà inferiore della Zona 6 (sabbie-sabbie limose), mentre alcuni dati cadono nelle Zone 5 e 4. Questo sistema di classificazione appare congruente con l'effettiva tipologia delle sabbie del Mare Adriatico, che bene si inquadrano nelle Zone 5 e 6.

I dati relativi alla formazione argillo-limosa (Figura 6b) cadono quasi completamente nella Zona 3 (argilla), e bene identificano la tipologia del terreno. Analogamente i valori della formazione limo-argillosa (Figura 6c) interessano, appropriatamente, la Zona 3. Infatti, viste le sue caratteristiche di plasticità, dal punto di vista del comportamento, in questo caso relativo allo sviluppo di sovrappressioni interstiziali, la formazione LA ha le caratteristiche tipiche di un'argilla.

5. Discussione dei risultati

Come prevedibile, il sistema di classificazione semplificato, basato su q_c e R_f , non consente una classificazione soddisfacente dei terreni coesivi profondi (Formazione LA), e la ragione principale è ritenuta la non considerazione degli effetti della profondità in tale sistema. I valori ottenuti per la Formazione

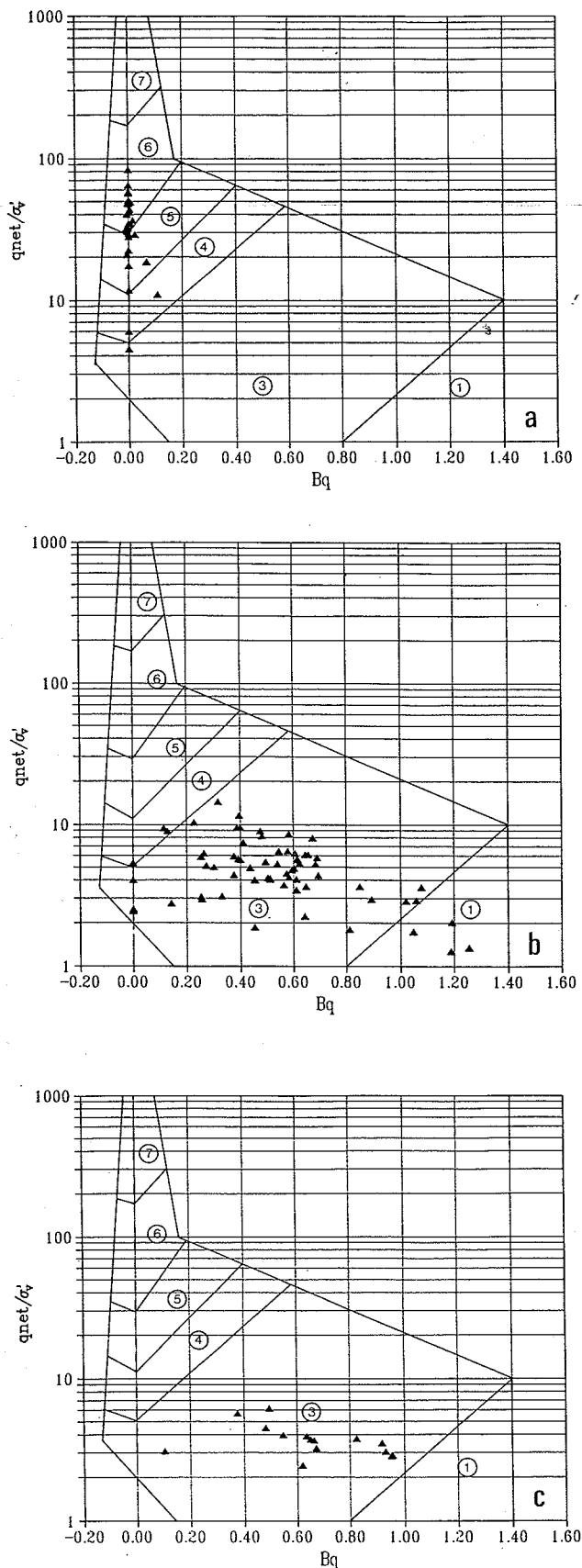


Fig. 6 - Tutti i dati di piezocono; sistema di classificazione normalizzato basato sui parametri Q_{ct} e B_q , a) sabbie e sabbie limose, b) argille limose, c) limi argillosi.

Fig. 6 - All piezocone data; normalized classification system based on Q_{ct} and B_q , a) sand and silty sand, b) silty clay, c) clayey silt.

AL interessano zone compatibili con l'effettiva tipologia dei terreni. Tuttavia i dati risultano dispersi ed interessano in modo significativo tre delle classi di cui è composto il diagramma di riferimento. Più soddisfacente è la collocazione dei terreni sabbiosi, anche a causa della minore sensibilità di q_c alle variazioni di profondità nella parte alta del diagramma.

Il sistema normalizzato, basato su Q_{ct} e F_R , colloca le sabbie in categorie soddisfacenti e congruenti con la granulometria del terreno, come verificata in laboratorio. Le formazioni coesive AL e LA si collocano principalmente nelle Zone 3 e 2. Mentre la prima riflette le caratteristiche dei terreni del Mare Adriatico, la seconda, riferita a terreni organici e torbe, non si adatta a queste formazioni dove componenti organiche sono talvolta presenti sottoforma di tracce. Questo fenomeno è osservabile in particolare nella formazione LA ed è probabilmente collegato alla resistenza relativamente bassa misurata in tali formazioni mediante prove di compressione triassiale [PELLI e OTTAVIANI, 1992]. Si noti che la formazione AL, sovraconsolidata con grado di sovraconsolidazione variabile, si colloca in una zona qualitativamente appropriata del diagramma, e cioè a destra dell'area delimitata dalle linee tratteggiate A e B.

Il sistema di classificazione normalizzato basato su B_q fornisce risultati soddisfacenti per tutte le formazioni oggetto di studio, inquadrando nelle argille i terreni coesivi e nelle sabbie limose quelli non coesivi. Si noti che in questo diagramma sono riportati soltanto una parte dei dati disponibili, quelli cioè ottenuti mediante piezocono. I valori di B_q sembrano fornire una indicazione di tipo qualitativo del grado di sovraconsolidazione dei terreni attraversati; i valori della formazione normalconsolidata LA sono infatti mediamente più elevati di quelli misurati nella formazione AL. Tuttavia la mole di dati disponibili non consente una valutazione dettagliata di questo aspetto.

6. Conclusioni

Lo studio presentato, relativo alla classificazione dei terreni del Mare Adriatico mediante prove penetrometriche statiche, consente di trarre le seguenti conclusioni:

- 1) Il sistema di classificazione semplificato fornisce indicazioni che in alcuni casi possono essere fuorvianti, soprattutto nei terreni coesivi collocati ad elevata profondità. Per i terreni sabbiosi il sistema sembra fornire risultati attendibili, probabilmente per la ridotta sensibilità del diagramma a variazioni di profondità in corrispondenza di valori di q_c elevati.

- 2) I sistemi di classificazione normalizzati basati sui parametri F_R e B_q consentono di valutare più razionalmente le caratteristiche di comportamento dei terreni attraversati. Nel sistema basato su F_R , i terreni coesivi considerati nel corso di questo studio tendono in parte a posizionarsi in una categoria relativamente bassa, riservata alle torbe ed ai terreni organici.
- 3) I sistemi di classificazione normalizzati sembrano offrire le possibilità di evidenziare, in via qualitativa, le differenti caratteristiche di sovraconsolidazione dei terreni coesivi. Nei confronti dei terreni normalconsolidati, quelli sovraconsolidati presentano mediamente valori più bassi del parametro B_q e più elevati della resistenza alla punta normalizzata q_{net}/σ'_{vo} e del rapporto di attrito laterale normalizzato F_R .
- 4) Risulta evidente che i conii piezometrici offrono potenzialità di classificazione superiori a quelle dei conii elettrici non piezometrici.
- 5) Si rileva la necessità di effettuare calibrazioni locali dei sistemi di classificazione indiretta, vista la complessità dei fattori che controllano i vari parametri.

BIBLIOGRAFIA

- BALIGH M. M., VIVATRAV V., LADD C.C. (1980) - *Cone penetration in soil profiling*. J. of the Geotech. Engrg. Divis., ASCE, n. 106, pp. 407-461.
- CLARK A. R., WALKER B. F. (1977) - *A proposed scheme for the classification and nomenclature for use in the description of middle easterns sedimentary rocks*. Géotechnique, vol. XXVII, n. 1, pp. 94-99.
- HOULSBY G. T., HITCHMAN R. (1988) - *Calibration chamber tests of a cone penetrometer in sand*. Géotechnique, vol. XXXVIII, n. 1, pp. 39-44.
- HOULSBY G. T., WROTH C. P. (1989) - *The influence of soil stiffness and lateral stress on the results of in-situ soil tests*. Proceedings, 12th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., Rio de Janeiro, vol. I, pp. 227-232.
- LUNNE T., CHRISTOFFERSEN H. P., TJELTE T. I. (1985) - *Engineering use of the piezocone data in North Sea clays*. Proceedings, 11th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., San Francisco, pp. 907-912.
- PELLI F., OTTAVIANI M. (1992) - *Definizione della resistenza non drenata delle argille del Mare Adriatico mediante prove penetrometriche statiche*. Rivista Italiana di Geotecnica, anno XXVI, n. 3, pp. 157-171.
- ROBERTSON, P. K. (1990) - *Soil classification using the cone penetration test*. Canadian Geotech. J., vol. XXVII, pp. 151-158.
- ROBERTSON P. K., CAMPANELLA R. G., GILLESPIE D., GRIEG J. (1986) - *Use of piezometer cone data*. Proceedings, In-Situ '86, ASCE Specialty Conference, Blacksburg, VA.
- SCHMERTMANN J. H. (1978) - *Guidelines for cone penetration test, performance and design*. Federal Highway Administration Report FHWA-TS-78-209, Washington, p. 145.
- SEARLE J. W. (1979) - *The interpretation of Begemann friction jacket cone results to give soil types and design parameters*. Proceedings, 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brighton, vol. II, pp. 265-270.
- TEH C. I., HOULSBY G. T. (1988) - *Analysis of the cone penetration test by the strain path method*. Proceedings, 6th International Con-

ference on Numerical Methods in Geomechanics, Innsbruck, vol. I, pp. 397-402.

TEH C. I., HOULSBY G. T. (1991) - *An analytical study of the cone penetration test in clay*. Géotechnique, vol. XLI, n. 1, pp. 17-34.

SUMMARY

Soil Classification in the Adriatic Sea by Cone Penetration Tests.

1. Introduction

Since the seventies several soil classification systems based on CPT and CPTU records have been developed [SCHMERTMANN, 1978; SEARLE, 1979; ROBERTSON *et al.*, 1986; ROBERTSON, 1990]. The empirical nature of these methods requires local verifications, by comparing the penetration data with site observations and laboratory tests.

In this paper CPT and CPTU records obtained at 17 different sites in the Adriatic Sea are analyzed in light of the soil classification systems developed by ROBERTSON *et al.* [1986] and ROBERTSON [1990] for standard electric cones and piezocones. The purpose of the study is to assess the applicability of such methods in the Adriatic Sea, with reference to the results of laboratory classification tests available in that area.

Offshore the cone penetration tests are often carried out at relatively large depths; in the Adriatic Sea the maximum investigation depth is usually 120 meters with respect to the mudline. This makes particularly interesting to compare these data with the existing classification systems which are mainly based on relatively shallow tests, usually less than 30 meters deep, as typically carried out onshore.

In the following the soil properties and the classification systems adopted in this study are briefly summarized.

2. Soil description

The soil formations in the area investigated are described below from top to bottom:

- o Formation A: limited thickness of normally consolidated clay, silty clay and clayey silt, recently deposited;
- o Formation B: overconsolidated ($OCR = 1 + 10$) clays and silty clays, Plastic Index from 15 to over 55, continental deposition environment, about 50 meters thick;
- o Formation C: sand overlying clayey silt, the latter is usually normally consolidated with Plastic Indexes between 7 and 35, marine deposition environment.

The sands are usually fine grained with fines content between 5 and 20 percent (see Figure 1), sometimes up to 40 percent, siliceous to calcarous-siliceous [CLARK and WALKER, 1977]. The cohesive soil can be classified as inorganic clay of low to medium plasticity (CL) or highly plastic (CH). Two typical grain size curves are given in Figure 1. Minor organic matter and shell fragments have been found at some sites.

The data used in this study come from the deeper part of Formation A and from Formation B (silty clays AL), as well as from Formation C (sand and silty sand S-SL and clayey silt LA) down to a depth of 120 meters below the mudline.

3. Classification systems based on CPT and CPTU records

Two different classification systems (simplified and normalized) are considered herein. The simplified classification system [ROBERTSON *et al.*, 1986; ROBERTSON, 1990] is based on the cone resistance q_c and the friction ratio R_f as defined in Eq. (1), where f_s is the sleeve friction. Note that no pore pressure measurements are required.

As shown in Figure 2, the classification chart defines twelve different zones; the soil types associated with each zone are described in Table I. In the upper zones (7 to 10) the cone penetration process takes place in a drained manner, whereas the lower soil zones (2 to

5) are characterized by undrained penetration. Zone 1 is associated with fine, sensitive soils, and Zones 11 to 12 include overconsolidated or cemented soils.

The simplified classification system is very easy to apply but it neglects the depth effects. ROBERTSON [1990] suggests that this method should not be used at depths exceeding 30 meters.

The normalized classification system [ROBERTSON, 1990] is depicted in Figure 3. The soil types associated with each zone are described in Table II. Q_{ct} is the normalized cone resistance, F_R is the normalized sleeve friction and B_q is the normalized pore pressure parameter. Q_{ct} is defined in Eq. (2), where σ_{vo} and σ'_{vo} are the total and effective vertical effective stresses, respectively. The parameter q_{ct} is the corrected cone resistance [LUNNE *et al.*, 1985] defined in Eq. (3), where u_o is the hydrostatic pore pressure at the hole bottom, u is the pore pressure measured by the piezocone and k_c and α are two correction factors accounting for excess pore pressures developing during cone penetration [PELLI and OTTAVIANI, 1992].

The classification system presented in Figure 3a is based on the normalized tip resistance and on the normalized friction ratio F_R , defined in Eq. (4). Normally consolidated soils are expected to fall between the dotted lines A and B (Figure 3a). Overconsolidated, aged or cemented soils are located on the right side of the chart, on top of lines A and B, whereas sensitive soils are located below the dotted lines, on the left side of the diagram.

The classification system reported in Figure 3b is based on the normalized cone resistance and on the parameter B_q , which defines the excess pore pressure measured during CPTU tests in a non dimensional form [ROBERTSON *et al.*, 1986]. B_q is defined in Eq. (5), where Δu is the excess pore pressure measured during penetration immediately behind the cone tip.

4. Analysis of the data

In Figure 4 the available data are plotted on a simplified classification chart. The sands (Figure 4a) plot mainly in Zones 8 (sand-silty sand) and 9 (sand), that are reasonable for this soil. The silty clays (Figure 4b) plot mainly in Zones 3, 4 and 5, and reach R_f values in excess of those considered in the classification chart as designed by ROBERTSON *et al.* [1986]. The data are widely scattered and keep within an area typical of undrained penetration. The clayey silts (Figure 4c) plot in Zones 3 (clay) to 7 (silty sand-sandy silt); the higher zones are not adequate to this soil which is characterized by undrained behaviour as observed during cone penetration.

In Figure 5 all the available data are plotted on a classification chart based on the normalized friction ratio F_R . Since 13 out of 17 sites were investigated by electric cones with no pore pressure measurements, the data were corrected based on the simplified relationship given in Eq. (6). The sands (Figure 5a) plot mostly in Zone 5 (silty sand-sandy silt), which is reasonably consistent with the soil characteristics as defined in the laboratory. The silty clay (Figure 5b) plots in Zones 3 (clay) and 2 (organic soil-peat). On the right side of the chart, a few points fall beyond the limit of the system propo-

sed by ROBERTSON [1990]. The values are located above the dotted lines A and B, which is consistent with soil overconsolidation. Zone 3 is satisfactory for this soil type, whereas Zone 2 does not seem appropriate. The clayey silts (Figure 5c) are normally consolidated and fall in proximity of the range defined by the two dotted lines. However even in this case many values fall below the limit between Zone 3 and Zone 2.

The normalized classification system based on B_q could only be applied to the data collected with piezocones, at 4 of the 17 sites considered. The data are shown in Figure 6.

The sand (Figure 6a) concentrates mainly in the lower part of Zone 6 (sand-silty sand) whereas fewer data fall within Zones 5 and 4. The silty clay (Figure 6b) and clayey silt (Figure 6c) fall almost completely within Zone 3 (clay).

5. Discussion of the results

As expected, the simplified classification system, based on q_c and R_f , is not satisfactory when applied to the deep clayey silt LA. The main reason is that this system does not take into account the depth effects. The values obtained for the silty clay AL mostly plot within the appropriate zone; however they are very scattered. The system is more satisfactory for the sand, probably due to a more limited sensitivity with respect to depth in the upper portion of the diagram.

The normalized classification system based on Q_{ct} and F_R gives satisfactory results for the sands. The cohesive soils plot in Zones 3 and 2; the latter is typical of organic soil and peat, and therefore it is not appropriate for the soil object of investigation. Note that the deep clayey silt was found to have low strength also in the laboratory [PELLI and OTTAVIANI, 1992]. The silty clay is overconsolidated and therefore its position on the right of lines A and B is justified.

The normalized classification system based on B_q gives satisfactory results for all soil types.

6. Conclusions

The following conclusions are drawn:

- 1) The simplified classification system may be misleading for deep cohesive soil. On the other hand reasonable results were obtained in sand.
- 2) The normalized classification systems based on F_R and B_q give a more satisfactory soil characterization. As for the system based on F_R , the cohesive soils considered in this study tend to fall in a very low zone, typical of peat and organic soils.
- 3) The normalized classification systems also give indications on soil overconsolidation.
- 4) The piezocones were found to allow for a more effective soil classification than standard electric cones.
- 5) The study showed that local calibration of the classification systems is required, given the complex factors controlling the various parameters involved.