

Applicabilità di prove penetrometriche statiche nella ricostruzione del profilo stratigrafico

Diego Lo Presti,* Claudia Meisina,** Nunziante Squeglia*

Sommario

La ripetitività delle misure e la possibilità di indagare un volume di terreno superiore a quello corrispondente a un campione in laboratorio e di ottenere registrazioni continue di parametri che mettono in luce peculiarità stratigrafiche, rendono le prove CPT e CPTu ideali per l'identificazione di variazioni litologiche e la ricostruzione del profilo stratigrafico. Il presente lavoro ha avuto come obiettivo la verifica dell'applicabilità delle principali correlazioni messe a punto in letteratura per individuare i tipi di terreno attraversati e quindi definire l'andamento stratigrafico lungo una verticale. A tale scopo sono stati selezionati alcuni siti rappresentativi di terreni italiani appartenenti a diversi contesti geologici e caratterizzati dal punto di vista geologico e geotecnico tramite indagini geognostiche, prove in situ (CPT e CPTu) e prove geotecniche di laboratorio. Le prove CPT e CPTu sono state eseguite nelle immediate vicinanze di sondaggi geognostici e in alcuni casi sono state ripetute in diversi periodi dell'anno corrispondenti al periodo più umido e più secco. Per le prove CPTu sono stati usati differenti metodi per la saturazione della punta con piezocono. La stratigrafia descritta nel sondaggio è stata messa a confronto con le stratigrafie desunte dalle prove penetrometriche CPT e CPTu con i vari metodi di classificazione utilizzati ed è stata calcolata la percentuale di successo di ogni metodo.

Parole Chiave: prove in situ, cone penetration test, classificazione del terreno.

1. Introduzione

L'impiego di prove penetrometriche statiche (CPT) e con piezocono (CPTu) è diventato sempre più frequente nella pratica professionale. Le prove CPT e CPTu sono strumenti economici, che permettono di ottenere misure continue di alcuni parametri del terreno (resistenza alla punta q_c , attrito laterale f_s , e nel caso delle CPTu, la pressione dell'acqua nei pori u durante l'avanzamento). La ripetitività delle misure e la possibilità di indagare un volume di terreno superiore a quello corrispondente a un campione in laboratorio e di ottenere registrazioni continue di parametri che mettono in luce peculiarità stratigrafiche, rendono le prove CPT e CPTu ideali per l'identificazione di variazioni litologiche e la ricostruzione del profilo stratigrafico. Tuttavia, allo stato attuale, la stratigrafia del sottosuolo può essere ricostruita solamente utilizzando correlazioni empiriche (carte di classificazione dei terreni) quali quelle di BEGEMANN [1965], SCHMERTMANN [1978] e SEARLE [1979] per le CPT e quelle di ROBERTSON *et al.* [1986], SENNESET *et al.* [1989], ROBERTSON [1990], ESLAMI e FELLENIUS [1997; 2000] per le CPTu. Più recentemente alcuni autori hanno proposto metodi non tradizionali di classificazione dei

terreni a partire da prove CPT che utilizzano la fuzzy logic [ZHANG e TUMAY, 1999], le reti neurali artificiali [KURUP e GRIFFIN, 2006] o approcci probabilistici [JUNG *et al.*, 2008]. Le correlazioni empiriche, disponibili in letteratura tecnica si basano su differenti database e soffrono dei limiti intrinseci di ogni correlazione di tale tipo (limiti nell'estrapolabilità a contesti diversi rispetto a quelli relativi al database). I metodi basati sulle reti neurali o approcci simili richiedono invece un addestramento specifico per potere essere utilizzate.

Sebbene le prove CPT e CPTu siano usate per la determinazione di diversi parametri, il presente lavoro riguarda solamente la determinazione del profilo stratigrafico. Nonostante sia raro il caso in cui il programma delle indagini non preveda l'esecuzione di almeno un sondaggio, cosicché la stratigrafia di massima si può considerare quasi sempre nota, al fine di sfruttare a pieno le potenzialità della prova, che è in grado di discriminare litologie differenti anche di spessore centimetrico, è necessario disporre di un metodo robusto ed efficiente per identificare il profilo stratigrafico di dettaglio dalle misure.

Pertanto con il presente lavoro si è perseguito l'obiettivo di verificare (in siti italiani) l'applicabilità delle principali correlazioni messe a punto in letteratura per individuare i tipi di terreno attraversati e potere quindi definire l'andamento stratigrafico lungo una verticale.

* Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Pisa

** Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pavia

2. Le prove CPT e CPTu

La prova penetrometrica statica (CPT, acronimo di Cone Penetration Test) consiste nell'infiggere a pressione nel terreno una punta conica misurando separatamente lo sforzo necessario per la penetrazione della punta (q_c) e l'adesione terreno - acciaio di un manicotto posto al di sopra della punta. Nella prova CPTu la punta con piezocono è una punta elettrica in cui è stato aggiunto un filtro poroso, la cui funzione è quella di misurare mediante un trasduttore la pressione dell'acqua presente nei pori del terreno durante la penetrazione.

2.1. Fattori strumentali che condizionano le misure e l'interpretazione delle prove CPT e CPTU

La forma delle punte meccaniche influenza, con modalità differenti a seconda della tipologia di terreno, i valori delle grandezze misurate (q_c , f_s) [CESTARI, 1990].

La riduzione di diametro della punta sopra la base del cono, nel penetrometro meccanico, comporta (rilevante soprattutto in sabbie molto addensate) misure della q_c minori di quelle ottenibili con una punta elettrica. L'attrito del terreno lungo il manicotto di protezione sopra il cono comporta invece che la q_c misurata sia maggiore di quella ottenibile con una punta elettrica (rilevante soprattutto in sabbie sciolte e argille tenere).

Nella punta con manicotto di Begemann non si misura solo l'attrito ma, a causa del raccordo all'estremità inferiore del manicotto, anche una parte di resistenza alla base (materiale rifluito dopo il passaggio della punta). Per questa ragione la f_s misurata con la punta meccanica è sempre maggiore di quella misurata con la punta elettrica (la differenza è praticamente trascurabile nelle argille).

La pressione dei pori u che agisce sulle aree disuguali della punta e del manicotto influenza sempre la resistenza alla punta, anche nel caso di punta meccanica. L'effetto è particolarmente rilevante nelle argille normalconsolidate, ma nessuna correzione può essere fatta poiché il valore della u non è noto. Solamente nelle prove eseguite con piezocono, essendo noto il valore di u , si preferisce introdurre nelle correlazioni i valori corretti di q_t (resistenza alla punta totale) che è maggiore della q_c misurata ed f_t (resistenza di attrito laterale totale) minore della f_s misurata.

È ampiamente accettato il fatto che le misure della q_c rappresentino la risposta locale o puntuale del terreno nell'intorno della punta. Tuttavia, ci si è posto il problema di quale porzione di terreno influenzi tali misure, al fine di poter stabilire lo spessore minimo di uno strato individuabile dalla resistenza penetrometrica. Una risposta è stata for-

mulata sulla base di analisi numeriche e misure in camera di calibrazione [VREUGDENHIL *et al.*, 1994; AHMADI e ROBERTSON, 2005]. I citati lavori unanimemente indicano che lo spessore dipende dal contrasto di rigidezza degli strati adiacenti. In particolare, la resistenza penetrometrica di uno strato soffice (argilla) al di sotto di uno strato rigido (sabbia densa) è pienamente mobilitata anche per spessori di 1-2 diametri, mentre è necessario uno spessore di 10-20 diametri per mobilitare pienamente la resistenza di uno strato rigido sottostante uno soffice.

Qualitativamente ed intuitivamente è possibile ipotizzare che nel primo caso la penetrazione mobiliti esclusivamente un meccanismo di rottura per punzonamento, mentre nel secondo caso si può immaginare un meccanismo di rottura intermedio tra "locale" e "generale".

2.2. Profilo stratigrafico da prove CPT e CPTU

Una completa rassegna dei metodi disponibili è reperibile in FELLENIUS e ESLAMI [2000]. I principali metodi per l'interpretazione stratigrafica di prove CPT meccaniche si basano sulla resistenza alla punta q_c e sul rapporto delle resistenze R_f per le ragioni illustrate di seguito. In particolare, la resistenza alla punta e l'attrito laterale possono essere interpretati come la portata unitaria di base e per attrito laterale di una fondazione profonda infissa. Nel caso di terreni granulari è possibile scrivere le seguenti relazioni:

$$q_c = N_{\gamma q} \cdot \sigma'_{vo} \quad (1)$$

$$f_s = K \cdot \tan \delta \cdot \sigma'_{vo} \quad (2)$$

dove: $N_{\gamma q}$ = fattore di capacità portante, σ'_{vo} = tensione verticale efficace geostatica, δ = attrito cono terreno, K = coefficiente di spinta.

Assumendo valori realistici del coefficiente di capacità portante, di quello di spinta e dell'attrito cono - terreno, risulta che f_s/q_c è compreso tra 0.2 e 2 %.

Nei terreni a grana fine, invece, valgono le seguenti relazioni:

$$q_c = N_c \cdot C_u + \sigma_{vo} \quad (3)$$

$$f_s = a \cdot C_u \quad (4)$$

dove: N_c = fattore di capacità portante in condizioni non drenate e C_u = resistenza al taglio non drenata.

In questo caso il rapporto f_s/q_c assume valori più elevati e varia significativamente con la profondità. In definitiva il campo di esistenza di $R_f = f_s/q_c$ nei terreni a grana fine è più ampio.

La situazione è ancora più complessa nei terreni intermedi dove è possibile una penetrazione con drenaggio parziale. Pertanto, i metodi di seguito il-

lustrati sono sostanzialmente calibrati sulla base di un certo insieme di dati sperimentali.

In pratica, il profilo stratigrafico da prove CPT meccaniche, viene di solito ricavato utilizzando uno dei seguenti approcci:

- a) BEGEMANN [1965]: la carta di classificazione per prove penetrometriche meccaniche è basata su 250 dati, relativi a suoli olandesi, ha in ordinata la q_c ed in ascissa l'attrito laterale locale f_s . Le linee (passanti per l'origine) che suddividono la carta in campi, consentendo l'identificazione del terreno, sono state ottenute sulla base della percentuale in peso di particelle con diametro inferiore a 16 μm .
- b) SCHMERTMANN [1978]: il grafico utilizza il database di Begemann e una serie di prove penetrometriche meccaniche eseguite nei terreni della Florida. Nelle ordinate la q_c è rappresentata in scala logaritmica, mentre il rapporto delle resistenze $R_f = (f_s/q_c) \cdot 100$ nelle ascisse è in scala lineare. La carta di classificazione fornisce anche indicazioni qualitative di addensamento per le sabbie (più il valore di q_c è alto e maggiore è la densità) e di compattezza per le argille (maggiore è il valore di f_s e più l'argilla è compatta). Le principali differenze con la carta di Begemann riguardano i limiti relativi alle diverse litologie e la non-linearità tra q_c ed f_s .
- c) SEARLE [1979]: la carta di classificazione presenta sull'asse delle ordinate la resistenza alla punta q_c (MPa) in scala logaritmica, e sulle ordinate la R_f nella medesima scala. Il metodo di Searle, come quello di Schmertmann, fornisce indicazioni aggiuntive, come l'addensamento per le sabbie e la consistenza dei terreni fini.

DOUGLAS e OLSEN [1981] hanno sviluppato una carta per prove penetrometriche con punta elettrica che non viene discussa nel presente lavoro dato che il database utilizzato si riferisce sostanzialmente a prove meccaniche e CPTu.

Per le prove CPTu le carte di classificazione maggiormente utilizzate sono descritte di seguito:

- a) ROBERTSON *et al.* [1986]: Robertson e Campanella hanno messo a punto due carte di classificazione utilizzando il medesimo parametro (q_t) per l'ordinata, ma due parametri diversi per le ascisse (R_f e B_q).

q_t è la resistenza alla punta corretta in base alla u misurata in fase di penetrazione e al rapporto delle aree An/Ac . Dove Ac = area del cono An = area netta

$$q_t = q_c + u_2 \cdot (1 - An/Ac)$$

$$R_f = \frac{100 \cdot f_s}{q_t}$$

B_q , è "il rapporto della pressione nei pori" (pore pressure ratio):

$$B_q = (u_2 - u_0) / (q_t - \sigma_{v0})$$

Dove:

- u_2 = pressione neutra misurata con un filtro poroso posto subito dopo la base del cono
- u_0 = pressione idrostatica
- q_t = resistenza alla punta corretta in base alla u

σ_{v0} = carico litostatico totale

Gli autori suggeriscono di utilizzare entrambi i grafici, perché i fattori di influenza sono numerosi. Ovviamente è possibile ottenere indicazioni differenti. In questo caso l'operatore deve sopperire con il proprio giudizio.

A puro titolo di esempio: se durante una prova otteniamo i seguenti valori: $q_t = 1 \text{ MPa}$; $R_f = 4\%$; $B_q = 0.1$ il terreno in esame potrebbe essere classificato argilla sulla carta q_t - R_f , e limo argilloso sull'altra. È possibile superare le incertezze con misure di dissipazione. Se la dissipazione è piuttosto rapida ($t_{50} < 60 \text{ s}$) il terreno appartiene alla seconda categoria.

- b) ROBERTSON [1990]: l'autore ha introdotto due nuovi parametri, per tenere conto dell'influenza che la pressione litostatica può esercitare con la profondità.

q_t normalizzata = $(q_t - \sigma_{v0}) / \sigma'_{v0}$; valore utilizzato nelle ordinate di entrambi i grafici

R_f normalizzata = $f_s / (q_t - \sigma_{v0})$

B_q normalizzata

$$Bq = \frac{\Delta U}{q_t - \sigma_{v0}}$$

dove:

$$\Delta U = u_2 - u_0$$

La carta di classificazione è applicabile solo dove il contributo delle tensioni litostatiche diventa alto, tanto da modificare significativamente la q_c . Per tale motivo l'autore consiglia di utilizzarli per profondità maggiori di 30 m dal piano di campagna.

- c) ESLAMI e FELLENIUS [1997]: la carta di classificazione messa a punto dai due autori si basa su un database contenente dati di prove CPT e CPTu, associati a prove di laboratorio per suoli provenienti da 20 siti in varie parti del mondo.

Il database non include casi di suoli cementati o argille molto compatte, e di conseguenza tali litotipi non vengono riportati nel grafico.

Sulle ascisse è riportata la f_s , sulle ordinate viene adottato un nuovo parametro chiamato q_E (resistenza alla punta efficace) = $(q_t - u_2)$.

In suoli sabbiosi densi la q_E differisce solo marginalmente dalla q_t ; al contrario in suoli fini la pressione neutra potrebbe (a causa del suo valore) rendere differenti i due parametri. La carta di classificazione viene divisa dagli autori in una



serie di campi, per la nomenclatura dei vari litotipi è stata utilizzata la classificazione del Canadian Foundation Engineering Manual (Canadian Geotechnical Society, 1985).

L'utilizzo delle carte di classificazione deve tuttavia tenere conto di alcune considerazioni:

- le correlazioni sono state messe a punto su terreni provenienti da contesti geologici che possono essere differenti da quelli dei suoli che si stanno esaminando. Le condizioni geologico-geotecniche (litotipo, grado di alterazione, di cementazione, di consolidazione, ecc.) dei terreni utilizzati per trovare le correlazioni andrebbero di conseguenza attentamente analizzate per verificare l'applicabilità delle stesse ai terreni studiati;
- importante è anche il tipo di attrezzatura penetrometrica utilizzata (punta meccanica, elettrica o piezocono). Non è lecito utilizzare una carta di classificazione sviluppata sulla base di prove meccaniche per interpretare i risultati di prove CPTu.

3. Metodologia di studio

La **prima fase** del lavoro ha riguardato la raccolta dati e l'esecuzione delle prove in sito ed in laboratorio per la caratterizzazione geotecnica dei terreni. Sono stati selezionati alcuni siti rappresentativi di terreni con differenti caratteristiche geologiche e caratterizzati dal punto di vista geologico e geotecnico tramite indagini geognostiche (sondaggi), prove in situ (CPT e CPTu) e prove geotecniche di laboratorio (granulometrie, limiti di Atterberg, prove di taglio diretto, prove triassiali UU, prove di compressione edometrica). Le prove CPT e CPTu sono state eseguite nelle immediate vicinanze di sondaggi geognostici e in alcuni casi sono state ripetute in diversi periodi dell'anno corrispondenti al periodo più umido (maggio-giugno o ottobre-novembre) e più secco (gennaio, luglio-agosto). Per le prove CPTu sono stati usati differenti metodi per la saturazione della punta con piezocono: con grasso, con olio di silicone e con glicerina.

È stato utilizzato un penetrometro TG63/100 da 100 KN con punta digitale di dimensioni standard, infissa secondo le procedure standard. Le caratteristiche del sistema di spinta e della punta sono indicate in PAGANI [2009]. Per le prove CPT è stata utilizzata una punta meccanica tipo Begemann.

La **seconda fase** ha riguardato l'elaborazione dei dati CPT e CPTu finalizzata alla classificazione litologica dei terreni e alla ricostruzione dei profili stratigrafici. La classificazione dei terreni è avvenuta utilizzando le carte di classificazione di cui al paragrafo 2.2. A tale proposito occorre fare alcune pre-

messe su alcuni limiti delle varie metodologie utilizzate:

- la carta di classificazione di BEGEMANN [1965] è di difficile applicazione per valori di $q_c < 5$ MPa e di $f_s < 50$ kPa, in quanto le linee che distinguono una classe dall'altra risultano molto ravvicinate;
- il metodo di SCHMERTMANN [1978] ha una minore accuratezza per bassi valori di q_c ;
- nel metodo di ROBERTSON [1990] la normalizzazione della resistenza alla punta e dell'attrito laterale in funzione del carico litostatico tende, a limitate profondità, a sovrastimare le classi granulometriche del terreno;
- le classi di terreno proposte dai vari autori indicano una transizione graduale da granulometrie fini a grossolane. Un terreno costituito da granulometrie molto differenti (es. argilla ghiaiosa) non potrà essere interpretato in modo corretto;
- la maggior parte dei metodi di classificazione sono basati su correlazioni statistiche tra dati penetrometrici e l'Unified Soil Classification System (USCS), di conseguenza non permettono un'accurata predizione del tipo di suolo basata sulla sua composizione (vd. granulometria) ma servono solo come guida per indicare il tipo di comportamento meccanico del terreno (Soil Behaviour Type SBT).

L'interpretazione stratigrafica delle prove CPT e CPTu è avvenuta mediante l'utilizzo dei software Static Probing della GeoStru Software per le prove CPT, di CPeT-IT 1.5 (2008) (GeoLogismiki Software) per le prove CPTu (metodi di ROBERTSON *et al.*, 1986; di ROBERTSON, 1990; e di Opensounding ver. 2.01 (2006) per le prove CPTu (metodo di ESLAMI e FELLENIUS, 1997).

Al fine di evitare di interpretare valori anomali locali per le prove CPTu sono state utilizzate metodologie di filtraggio dei valori di q_c , u e f_s [CHERUBINI e VESSIA, 2006]. A tal fine è stato impiegato il metodo di VIVATRAT [1979], che si basa sulla stima di intervalli di valori che possono essere considerati fluttuazioni delle misure "normali" rispetto a valori stimati come "anomali".

La procedura Vivatrat può essere sintetizzata nei seguenti punti:

1. Si riporta in un grafico l'andamento spaziale delle misure da filtrare.
2. Si suddividono le misure in finestre spaziali di ampiezza D , compresa tra 0.5m e 2.5m, che individuano dei sottostrati.
3. Si calcolano il valore medio \bar{u} e lo scarto quadratico medio s per ogni sottostrato.
4. Si calcola la "dispersione rappresentativa" S_r , definita come il valore minimo tra le seguenti espressioni:

$$Sr = \frac{1}{2} * (S_{i+1} + S_i)$$

$$Sr = \frac{1}{2} * (S_{i-1} + S_i)$$

$$Sr = \frac{1}{2} * (S_{i+1} + S_{i-1})$$

dove S_{i-1} , S_i ed S_{i+1} sono le deviazioni standard calcolate per i sottostrati (i-1)-esimo, i-esimo e (i+1)-esimo rispettivamente.

5. Si eliminano, dall'andamento spaziale, quelle misure i cui valori non appartengono all'intervallo: $\mu_i \pm A * Sr$

dove μ_i è il valore medio delle misure appartenenti ad ogni sottostrato i, Sr è la deviazione standard caratteristica ed A è il coefficiente che definisce l'ampiezza del semi-intervallo considerato accettabile per i valori assunti dalle misure. I valori del parametro A devono essere contenuti tra i seguenti valori: $2.5 > A > 0.5$.

Nel caso in studio i valori di D sono stati variati da 1m a 2m con un passo di 0.5m.

La **terza fase** è consistita nel confronto tra la stratigrafia descritta nel sondaggio (semplificata secondo i tipi di terreno proposti dagli autori delle carte di classificazione) e le stratigrafie desunte dalle prove penetrometriche CPT e CPTu con i vari metodi di classificazione utilizzati. È stata calcolata la percentuale di successo di ogni metodo come rapporto tra la lunghezza in centimetri degli intervalli di una classe litologica classificati correttamente dalla prova CPT e CPTu e la lunghezza totale in centimetri degli intervalli totali della classe litologica descritti nel sondaggio.

4. Siti indagati

La verifica dell'applicabilità delle correlazioni empiriche messe a punto in letteratura per la ricostruzione della stratigrafia del terreno a partire da prove CPT e CPTu è stata effettuata sulla base di indagini eseguite in vari siti ben caratterizzati dal punto di vista geotecnico e rappresentativi delle seguenti condizioni geologiche (Fig. 1):

- depositi torbosi (Sito A);
- depositi di origine fluvio-lacustre principalmente argillosi, torbosi o limoso-sabbiosi, estremamente eterogenei sia con la profondità che in senso areale (Sito B);
- depositi alluvionali terrazzati costituiti da ghiaia in matrice limoso argillosa, ghiaie, sabbie (Sito C);
- depositi alluvionali terrazzati della Pianura Padana prevalentemente sabbiosi (Sito D);
- depositi alluvionali recenti del F.Po (Sito E);
- depositi di conoide alluvionale (Sito F);



Fig. 1 – Carta con l'ubicazione dei siti indagati.
Fig. 1 – Test sites location.

- depositi alluvionali terrazzati antichi a Sud del F. Po (Siti G e H);
- depositi lagunari e palustri (Sito I).

Il tipo di indagini effettuate in situ e in laboratorio per ogni sito, nonché la distanza tra sondaggi e prove penetrometriche, sono illustrate in tabella I. Ad eccezione del sito A per il quale il sondaggio è stato eseguito a notevole distanza dalle prove penetrometriche, negli altri casi la distanza massima tra prove in situ e indagine geognostiche è stata di qualche metro, anche in relazione all'omogeneità del sito. La tabella II riassume le caratteristiche geologiche dei siti esaminati.

4.1. Sito A – Depositi torbosi

L'area in cui sono state eseguite le prove si trova nei pressi del Lago di Massaciuccoli (LU).

La successione stratigrafica, ricostruita tramite sondaggi, è costituita da depositi torbosi fino a 8-9 m, da sabbia silicea fino a 13 m a cui seguono fino a -70 m argille lacustri. In questo contesto sono state realizzate le cinque prove CPT meccaniche analizzate in questo lavoro, che presentano profondità variabile da 9 a 12 m e che di conseguenza hanno interessato i depositi torbosi ed in parte le sabbie silicee (Fig. 2). Per il sito in esame non sono disponibili indagini di laboratorio. Inoltre, il profilo stratigrafico di riferimento è molto sommario e si riferisce a

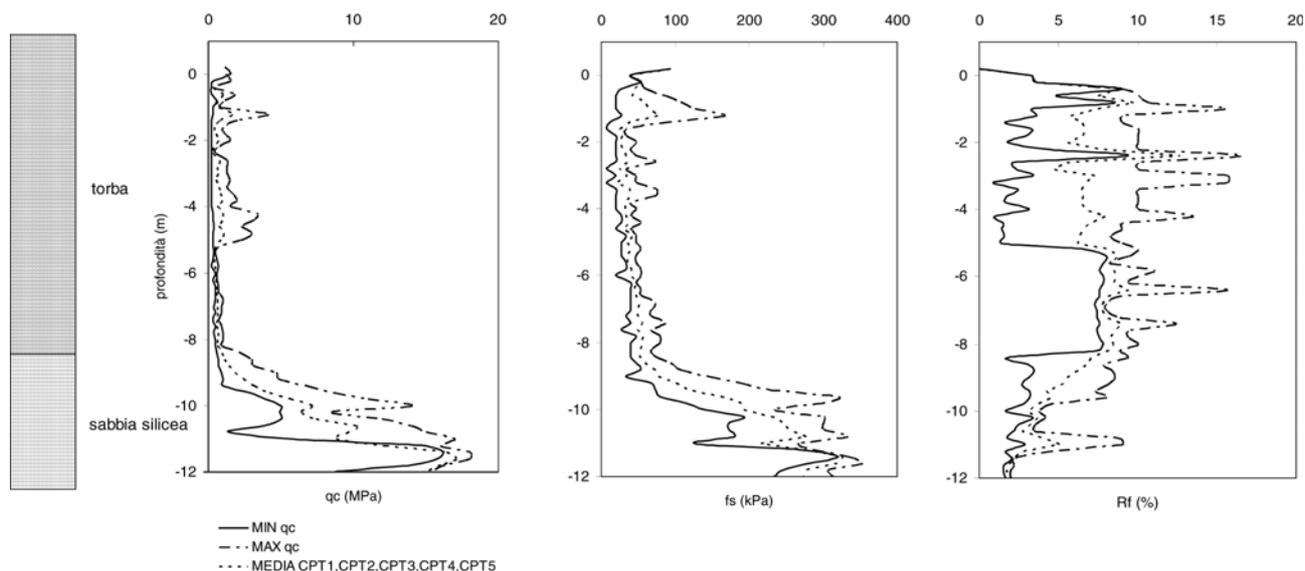


Fig. 2 – Profilo stratigrafico e risultati prove CPT – Sito A. qc: resistenza alla punta; fs: attrito laterale locale; Rf: rapporto delle resistenze ($f_s/q_c \cdot 100$).

Fig. 2 – Soil profile and CPT test results – Site A. qc: cone resistance; fs: sleeve friction; Rf: friction ratio ($f_s/q_c \cdot 100$).

un sondaggio eseguito in zona ma non in prossimità delle verticali delle CPT. Data la vicinanza al lago si è assunto il terreno come saturo sino al piano campagna.

Le prove CPT presentano un andamento della resistenza alla punta uniforme con valori che si mantengono inferiori ai 5 MPa sino a 7,5-8 m per poi aumentare gradualmente fino a valori superiori ai 15 MPa in corrispondenza delle sabbie. Il rapporto delle resistenze risulta più variabile e mostra un andamento irregolare per i 4 metri superficiali; questo può essere indice di alternanze tra litologie diverse. Superati i 4 m il valore si stabilizza su valori prossimi al 10 % per tutte le prove. A 7,5-8 m il rapporto delle resistenze si abbassa a valori inferiori al 5% (Fig. 2).

4.2. Sito B - Depositi di origine fluvio-lacustre

Le prove penetrometriche CPT e CPTu e i sondaggi sono stati eseguiti nella piana compresa tra Altopascio e Bientina (LU). La piana si sviluppa tra il Monte Pisano a Ovest e le Colline delle Cerbaie a Est ed è parte di una più ampia depressione tettonica che prosegue verso Nord con la Piana di Lucca e verso Sud con il graben della Val d'Era. Tale depressione venne occupata nel Pliocene Inferiore da un bacino di tipo lacustre, colmato e poi bonificato nel XIX secolo. Le indagini hanno interessato i depositi più superficiali olocenici (Tabb. I e II).

Dai sondaggi emerge un'estrema eterogeneità litologica e granulometrica, è presente un'alternanza di limi argillosi, argille limose e limi sabbiosi nei primi 10-11 m di profondità seguiti da uno

strato sabbioso e quindi ghiaioso che si estende fino alla massima profondità indagata.

Dal punto di vista geotecnico nei primi metri di profondità sono distinguibili 2 livelli (Fig. 3):

- un primo livello che si estende fino alla profondità di 4 m è caratterizzato da elevati Wl (54-74%) e IP (24-35%); la composizione granulometrica consiste sostanzialmente di limi, argille e torbe presenti in diverse percentuali (OH). Il contenuto in sostanza organica è anche molto variabile dal 7% (2.9 m) al 50% (0.7 m). La resistenza alla punta q_c è inferiore a 0.30 MPa, mentre la u assume valori minori di 100 kPa.
- Un secondo livello è costituito da limi argillosi e/o sabbiosi in alternanze caratterizzati da valori di Wl compresi tra 23 e 38 % e IP molto bassi (< 12) (CL, ML). La resistenza alla punta presenta valori < 2 MPa tranne tra 7.6 e 7.9 m e a profondità maggiori di 8.3 m.

4.3. Sito C - Depositi alluvionali terrazzati (F. Serchio)

Le prove penetrometriche ed i sondaggi geotecnici sono stati eseguiti nei depositi alluvionali terrazzati olocenici del Fiume Serchio (LU). Si tratta di sedimenti costituiti da ciottoli in matrice limoso argillosa, ghiaie, sabbie e limi talora pedogenizzati con uno spessore compreso tra 9 m e 15 m, sovrastanti le "Argille, sabbie e conglomerati di Fornaci di Barga" (argille e argille sabbiose o sabbioso-limose grigie, con intercalazioni di sabbie e di ghiaie e conglomerati in matrice argilloso-sabbiosa).

Il sondaggio S16, utilizzato nel presente lavoro (Tab. I, Fig. 4) ha rilevato sabbie con ciottoli fino a

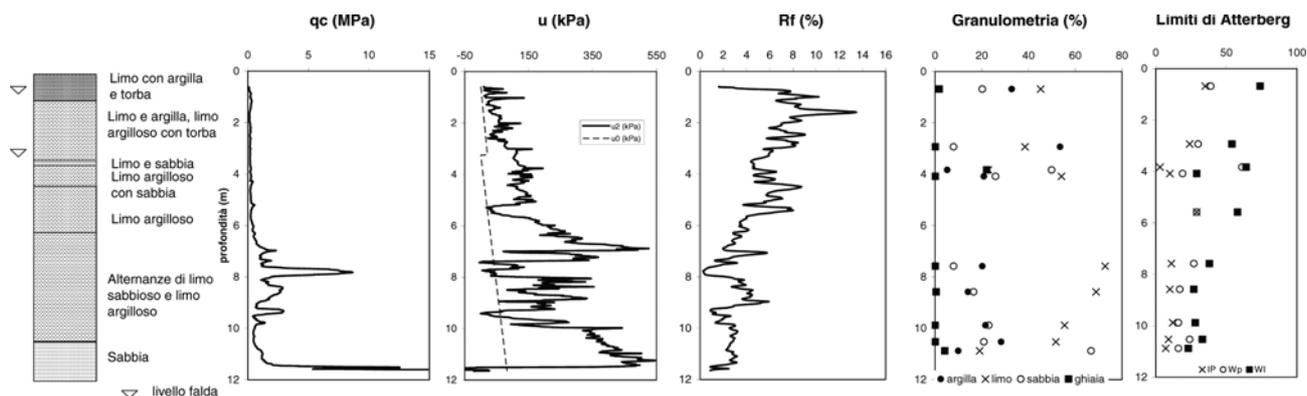


Fig. 3 – Profilo stratigrafico e caratteristiche geotecniche – Sito B (CPTu2). qc: resistenza alla punta; u0: pressione idrostatica; u2: pressione dinamica dei pori; fs: attrito laterale locale; Rf: rapporto delle resistenze ($f_s/q_c \cdot 100$), IP: indice plastico; Wp: limite plastico; WL: limite liquido.

Fig. 3 – Soil profile and geotechnical characteristics – Site B (CPTu2). qc: cone resistance; u0: in-situ pore pressure; u2: pore pressure measured at cone base; fs: sleeve friction; Rf: friction ratio ($f_s/q_c \cdot 100$) IP: plastic index; Wp: plastic limit; WL: liquid limit.

3,20 m (SW), alternanze di sabbie limose e limi sabbiosi (SM, ML) da 3,20 a 12,10 m, conglomerati in matrice sabbiosa da 12,10 a 14,30 m sovrastanti le argille plioceniche.

Le prove penetrometriche presentano un andamento della resistenza alla punta con valori più elevati e irregolari nei primi 2-3 metri, dove vengono raggiunte resistenze comprese tra i 2 ed i 20 MPa. A profondità superiori la resistenza alla punta scende a 1 MPa, con picchi isolati che raggiungono i 4-5 MPa. Il passaggio ai conglomerati corrisponde ad un brusco aumento dei valori di q_c .

Le pressioni neutre u_2 non presentano variazioni importanti fino a -4,6 m in corrispondenza di litologie prevalentemente sabbiose, mentre diventano più irregolari in relazione alle alternanze di limi sabbiosi e argillosi.

4.4. Sito D – Depositi alluvionali terrazzati della Pianura padana prevalentemente sabbiosi

La prova CPTu è stata eseguita in corrispondenza di un terrazzo alluvionale (Pleistocene Superiore) nel mantovano. La stratigrafia risulta relativamente omogenea e costituita da terreni limoso-sabbioso e argilloso-sabbiosi con spessore variabile tra 1,5 (bassi topografici) e 8 m (alti topografici) e, a seguire, sabbie prevalentemente medie a buon grado di addensamento (Fig. 5). Solo localmente, a profondità comprese tra i 6 m e i 12 m, sono state individuate lenti ghiaiose che hanno comportato l'interruzione di altre prove CPTu.

L'andamento della resistenza alla punta q_c presenta un profilo irregolare nei primi 5 metri dove oscilla tra 2 e 25 MPa, i valori diminuiscono fino a 1 MPa tra 5 e 5,9 m, in corrispondenza di un livello argilloso. A profondità superiori la resistenza alla punta presenta valori di 10-15 MPa con picchi che

superano i 20 MPa. Il rapporto R_f tra l'attrito laterale e la resistenza alla punta mostra in modo più evidente il passaggio tra le alternanze limoso-argilloso-sabbiose dei primi metri e le sabbie sottostanti. Le pressioni neutre presentano un andamento irregolare sopra il livello della falda, mentre non si discostano significativamente dai valori idrostatici a profondità superiori ai 5,7 m (Fig. 5).

4.5. Sito E - depositi alluvionali recenti del Fiume Po

L'area è situata in corrispondenza dei depositi olocenici del Fiume Po in località Calendasco (PC). La stratigrafia del terreno è caratterizzata da limi argillosi e limi sabbiosi (CL) con intercalazioni sabbiose fino a profondità variabili da 8,6 a 6,6 m (Fig. 6). A profondità maggiori è presente un orizzonte ghiaioso. Le 2 prove CPTu sono state realizzate saturando la punta con grasso (CPTu1) e con olio di silicone (CPTu2).

I valori di q_c e f_s misurati saturando la punta con grasso e silicone non mostrano significative differenze (Fig. 6). La q_c presenta valori inferiori a 2 MPa negli strati superficiali ed aumenta fino a un massimo di 6 MPa alla quota di circa 1 metro, tale aumento non è correlato ad un cambiamento litologico in quanto questo avviene alla profondità di 2,10 m (passaggio da limo argilloso a limo sabbioso), ma può essere messo in relazione alla presenza di una zona di terreno disseccata (le prove sono state eseguite nel mese di luglio).

4.6. Sito F - Depositi di conoide alluvionale

L'area ricade in corrispondenza del conoide del Torrente Scuropasso (PV), affluente appenninico di destra del F. Po ed è costituita da argille limose e limi argillosi molto eterogenei (CH, CL)



Tab. I – Sintesi delle indagini effettuate nei siti campione. CPTu: sat: tipo di fluido utilizzato per la saturazione; os: saturazione con olio di silicone; g: grasso; gli: glicerina. Tipo di sondaggio: cc: sondaggio a carotaggio continuo; d: sondaggio a distruzione di nucleo. Prove di laboratorio: caratteristiche fisiche (granulometria) e proprietà indice (limiti di Atterberg) (CL); sostanze organiche (SO); caratteristiche volumetriche (P); edometriche (ED); taglio diretto (TD); triassiali (CU, UU); colonna risonante (RCT). Campioni: rimaneggiati (D), indisturbati (I).

Tab. I – Summary of the geotechnical surveys in the test sites: CPTu: sat: type of fluids used for saturation; os: saturation with silicon oil; g: saturation with grease; gli: saturation with glycerin. Borehole typology: cc: borehole with continuous sampling; d: auger drilling. Laboratory tests: grain size distribution and index properties (Atterberg limits) (CL); organic matter (SO); volumetric characteristics (P); oedometer (ED); direct shear test (TD); triaxial test (CU, UU); resonant column (RCT). Sample typology: remoulded (D), undisturbed (I).

SIT I	Distanza CPT/ CPTU e sondaggio	CPT			CPTu				Sondaggi				Prove di laboratorio	
		N°	data	Prof (m)	N°	data	Prof (m)	sat	N°	data	Prof (m)	tip o	tipo	campioni
A	Alcuni km	5		9-12					1		30			
B					CPTu 1	5/12/07	11.05	os	S1	28-29/ 11/07	20	cc	CL, SO, P, ED, TD, UU, RCT	D, I
	35 m	1	5/12/07	11.6	CPTu 2	5/12/07	11.6	os	S2	29-30/ 11/07	20	cc	CL, SO, P, ED, TD, UU, RCT	D, I
C					CPTu 1	18/08/07	10.2	os	S4	12/05/04	52	cc	CL, P, ED, TD, UU, RCT	D, I
	14 m				CPTu 2	18/08/07	11.3	os	S1 6	26/09/07	15	cc	CL, P, ED, TD, UU, RCT	D, I
					CPTu 4	18/08/07	16.4	os	S1 5	26/09/07	15	cc	CL, P, ED, TD, UU, RCT	D, I
D	4 m				1	9/04/03	30	gli	1	Marzo 2003	30	cc	CL, ED, TD, UU	D, I
E	2 m	4	11/06/ 02	6-7	CPTu 1	2/07/02	6.7	g	1	2/07/02	4.25	cc	CL, P	D, I
					CPTu 2	2/07/02	6.7	os						
F	1 m				CPTu 1	13/06/01	10.94	g	1	1/05/94	3.1	cc	CL, P, ED	D, I
					CPTu 2	28/09/01	11.01	g						
G	1 m				CPTu	28/09/01	11.01	g	1	1/05/94	3.3	cc	CL, P, ED	D, I
H	1 m				CPTu 1	10/01/03	10	os	1		15	d		D, I
					CPTu 2	28/09/01	12.49	g	1	28/09/01	4	cc	CL, P, ED	
I	< 5 m				CPTu	6/06/ 2008	22.45	os						

fino alla profondità di 19 m sovrastanti depositi ghiaiosi sede di una falda semi-confinata (Fig. 7). Le prove CPTu sono state ripetute in diversi periodi dell'anno corrispondenti ad un periodo umido (13/06/2001) e ad uno secco (28/09/2001); in entrambi i casi la punta è stata saturata con grasso.

Dai risultati ottenuti dalle prove CPTu si nota che la q_c raggiunge valori prossimi a 7 MPa (perio-

do umido) e 4 MPa (periodo asciutto) in corrispondenza del materiale di riporto, a profondità maggiore essa diminuisce mantenendo valori differenti nelle due prove fino a circa 2.8 m; da questo punto in poi i valori di q_c sono simili (2 MPa). I valori più elevati di q_c nello strato di terreno di riporto sono probabilmente da riferire alla presenza di materiale grossolano, incontrato solamente nella CPTu1. I più elevati valori di resistenza penetra-

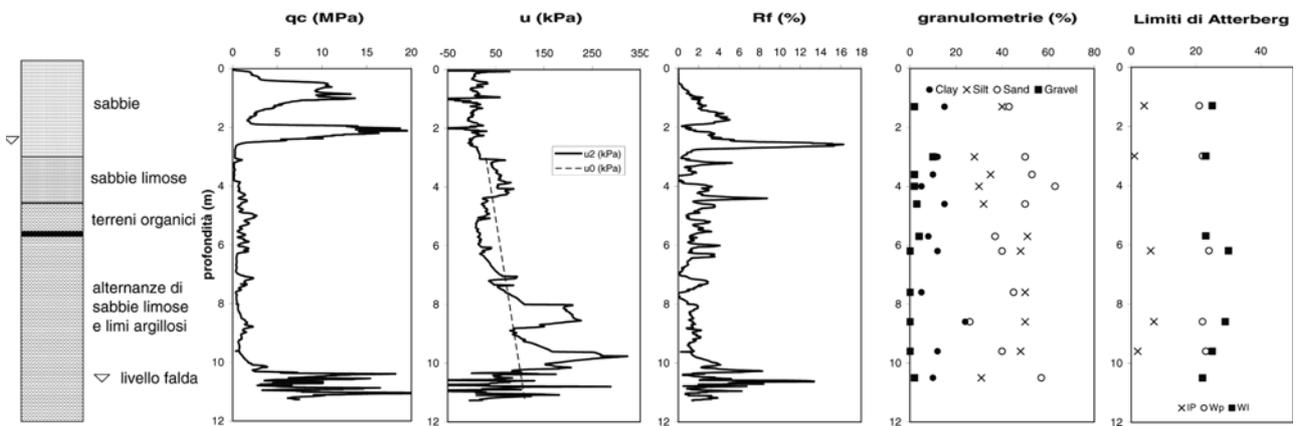


Fig. 4 – Profilo stratigrafico e caratteristiche geotecniche – Sito C (CPTu2). qc: resistenza alla punta; u0: pressione idrostatica; u2: pressione dinamica dei pori; fs: attrito laterale locale; Rf: rapporto delle resistenze ($f_s/q_c \cdot 100$), IP: indice plastico; Wp: limite plastico; WL: limite liquido.

Fig. 4 – Soil profile and geotechnical characteristics – Site C (CPTu2). qc: cone resistance; u0: in-situ pore pressure; u2: pore pressure measured at cone base; fs: sleeve friction; Rf: friction ratio ($f_s/q_c \cdot 100$); IP: plastic index; Wp: plastic limit; WL: liquid limit.

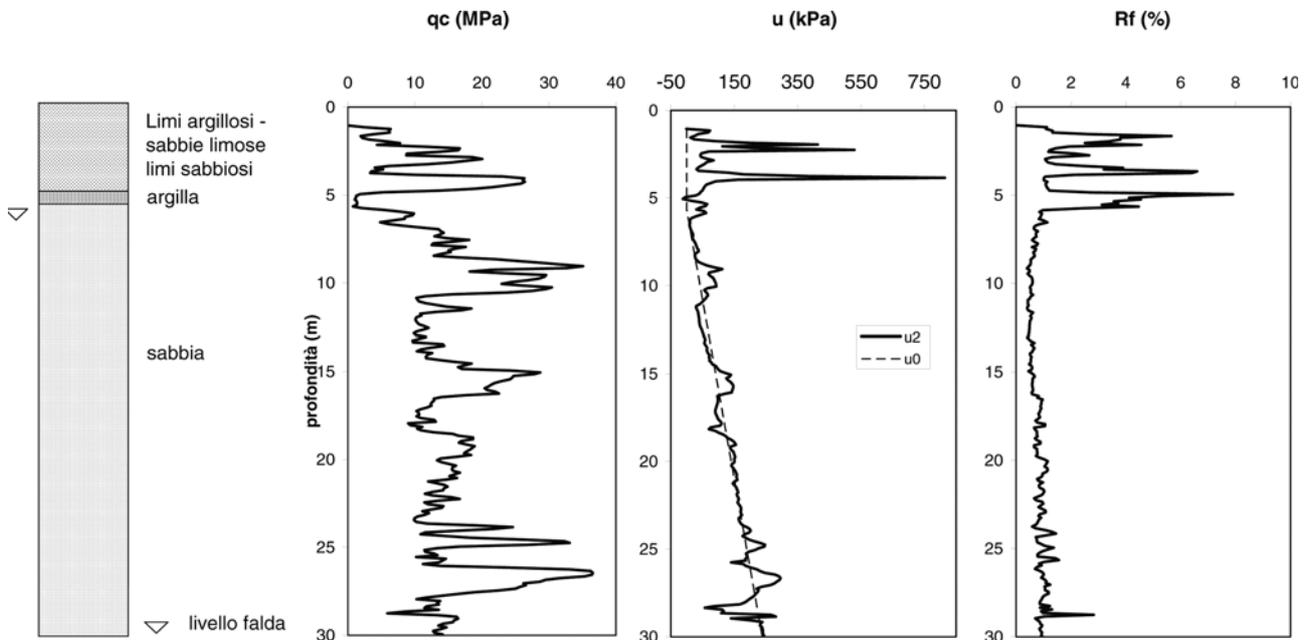


Fig. 5 – Profilo stratigrafico e caratteristiche geotecniche – Sito D. qc: resistenza alla punta; u0: pressione idrostatica; u2: pressione dinamica dei pori; fs: attrito laterale locale; Rf: rapporto delle resistenze ($f_s/q_c \cdot 100$).

Fig. 5 – Soil profile and geotechnical characteristics – Site D. qc: cone resistance; u0: in-situ pore pressure; u2: pore pressure measured at cone base; fs: sleeve friction; Rf: friction ratio ($f_s/q_c \cdot 100$).

metrica, osservati nel periodo asciutto sino alla profondità di quasi 3.0 m, sono invece da imputarsi ai più elevati valori delle tensioni efficaci per effetto della parziale saturazione nel periodo asciutto. L'andamento differente della q_c nei due periodi, confermato anche da quello del rapporto delle resistenze Rf, sembra evidenziare lo spessore di terreno che risente delle variazioni di umidità in risposta al clima ("zona attiva").

Le pressioni neutre u mostrano un andamento diverso a seconda del periodo. Nella CPTu1

(periodo umido) si possono osservare valori ridotti prossimi al piano campagna ($u < 25$ kPa) e un aumento molto contenuto in profondità. Al contrario nella CPTu2 (periodo asciutto) si hanno valori negativi fino a 2.5 m (probabilmente legati alla parziale saturazione) ed un aumento della u a profondità superiori. Il picco di pressione osservato in prossimità del piano campagna non sembra trovare spiegazioni razionali. In generale la saturazione con grasso del filtro non sembra dare buone misure della pressione interstiziale.

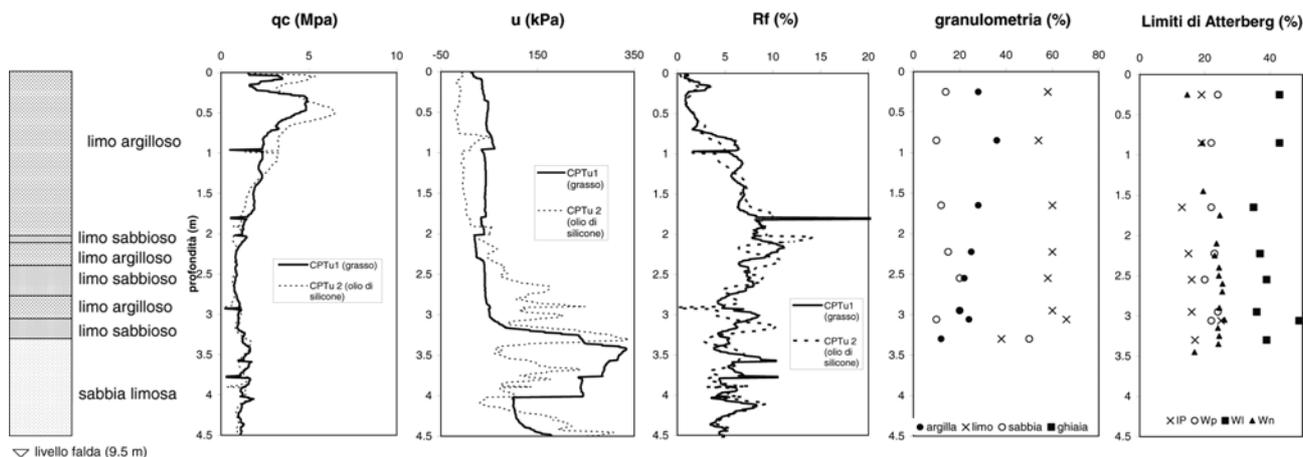


Fig. 6 – Profilo stratigrafico e caratteristiche geotecniche – Sito E. qc: resistenza alla punta; fs: attrito laterale locale; Rf: rapporto delle resistenze ($fs/qc \cdot 100$), IP: indice plastico; Wp: limite plastico; Wl: limite liquido, wn: contenuto in acqua naturale.

Fig. 6 – Soil profile and geotechnical characteristics – Site E. qc: cone resistance; fs: sleeve friction; Rf: friction ratio ($fs/qc \cdot 100$) IP: plastic index; Wp: plastic limit; Wl: liquid limit, wn: natural water content.

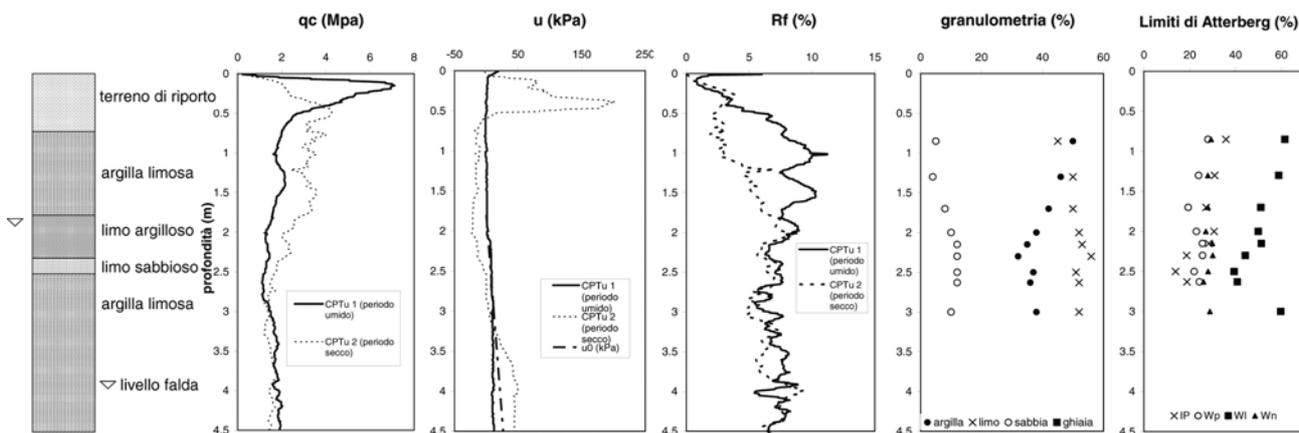


Fig. 7 – Profilo stratigrafico e caratteristiche geotecniche – Sito F. qc: resistenza alla punta; u0: pressione idrostatica; fs: attrito laterale locale; Rf: rapporto delle resistenze ($fs/qc \cdot 100$), IP: indice plastico; Wp: limite plastico; Wl: limite liquido, wn: contenuto in acqua naturale.

Fig. 7 – Soil profile and geotechnical characteristics – Site F. qc: cone resistance; u0: in-situ pore pressure; u2: pore pressure measured at cone base; fs: sleeve friction; Rf: friction ratio ($fs/qc \cdot 100$) IP: plastic index; Wp: plastic limit; Wl: liquid limit, wn: natural water content.

4.7. Sito G – Depositi alluvionali terrazzati antichi a Sud del F. Po

L'area ricade in corrispondenza di un terrazzo alluvionale antico nell'Oltrepò Pavese (PV). In particolare il profilo stratigrafico (Fig. 8) è caratterizzato da un orizzonte argilloso-limoso (CH) che si estende sino alla massima profondità investigata pari a circa 4 m e presenta nella parte bassa numerose concrezioni carbonatiche. Questo strato presenta un'intercalazione di limi e limi argillosi (CL) di probabile origine eolica di spessore pari a circa 2 m. Nella prova CPTu la punta è stata saturata con grasso.

La q_c raggiunge valori elevati (> 10 MPa) negli strati superficiali fino a 1 m di profondità (Fig. 8); a

profondità superiore si mantiene costante (3-4 kPa) fino a 3.3 m. La u registra valori negativi intorno alle profondità di 1 m e si avvicina allo zero a 3 m.

Gli alti valori di q_c , i bassi valori di Rf e le pressioni neutre nulle o negative nella parte superficiale delle prove possono essere spiegate con la presenza di uno strato di terreno parzialmente saturo o asciutto.

4.8. Sito H - Depositi alluvionali terrazzati antichi a Sud del F.Po

L'area campione è situata in corrispondenza di un terrazzo alluvionale antico in Oltrepò Pavese (PV). È costituita da una copertura argillosa di spes-

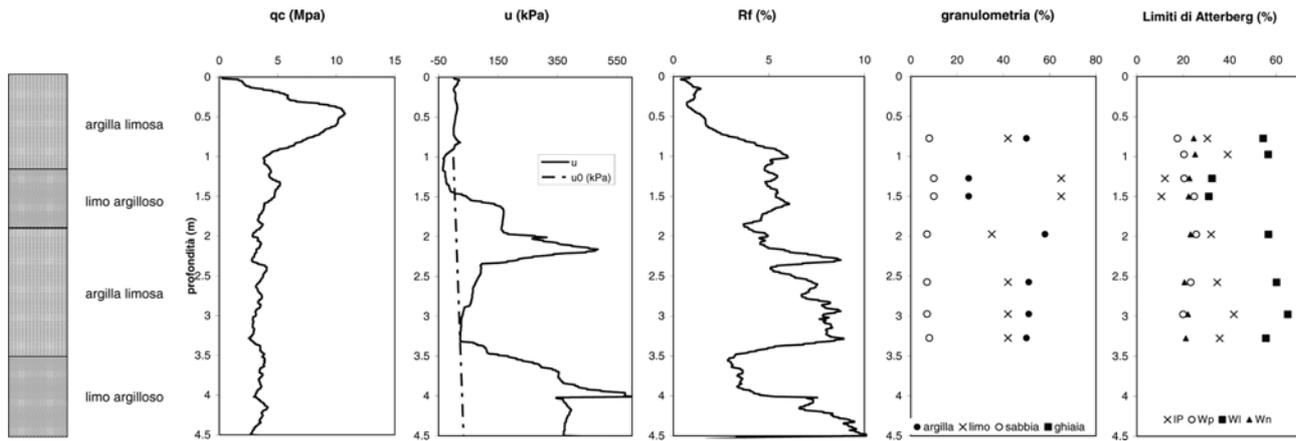


Fig. 8 – Profilo stratigrafico e caratteristiche geotecniche – Sito G. qc: resistenza alla punta; u0: pressione idrostatica; fs: attrito laterale locale; Rf: rapporto delle resistenze ($f_s/q_c \cdot 100$), IP: indice plastico; Wp: limite plastico; WI: limite liquido, wn: contenuto in acqua naturale.

Fig. 8 – Soil profile and geotechnical characteristics – Site G. qc: cone resistance; u0: in-situ pore pressure; u2: pore pressure measured at cone base; fs: sleeve friction; Rf: friction ratio ($f_s/q_c \cdot 100$) IP: plastic index; Wp: plastic limit; WI: liquid limit, wn: natural water content.

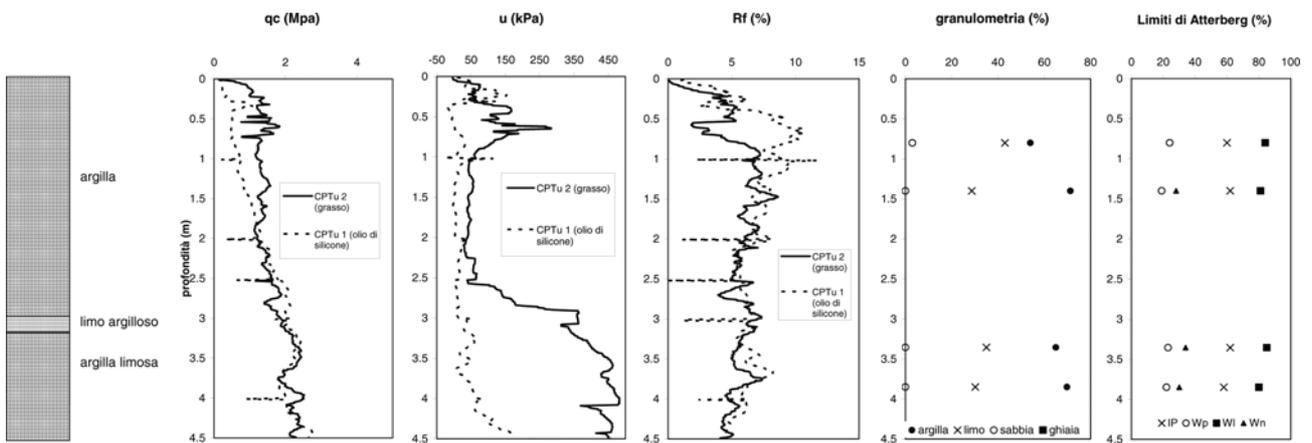


Fig. 9 – Profilo stratigrafico e caratteristiche geotecniche – Sito H. qc: resistenza alla punta; fs: attrito laterale locale; Rf: rapporto delle resistenze ($f_s/q_c \cdot 100$), IP: indice plastico; Wp: limite plastico; WI: limite liquido, wn: contenuto in acqua naturale.

Fig. 9 – Soil profile and geotechnical characteristics – Site H. qc: cone resistance; fs: sleeve friction; Rf: friction ratio ($f_s/q_c \cdot 100$) IP: plastic index; Wp: plastic limit; WI: liquid limit, wn: natural water content.

sore di circa 3 m (CH), che ricopre depositi alluvionali antichi costituiti da limi argillosi, argille sabbiose e sabbie argillose. A loro volta queste giacciono su formazioni plioceniche (Argille di Luggano) a profondità maggiori di 9 m. (Fig. 9).

Le prove CPTu sono state ripetute in diversi periodi dell'anno corrispondenti a periodi secchi (10/01/2003 e 28/09/2001); la punta è stata saturata rispettivamente con olio di silicone e con grasso.

La q_c presenta in prossimità del piano campagna valori ridotti (0.17 MPa), aumenta in modo lento e graduale fino a 4 m.

I valori delle u oscillano intorno allo zero, con valori minimi negativi di -18.8 kPa fino 3 m in corrispondenza dell'argilla. Dai 3 ai 4 m, in cui si ha alternanza di limo e argilla, i valori della u aumentano

fino a 200 kPa. Le pressioni neutre sono diverse per le due prove, a causa del diverso periodo di esecuzione e della diversa saturazione del filtro. La punta saturata con silicone rileva in genere valori più ridotti e talvolta negativi, mentre la punta saturata con grasso misura valori maggiori e sempre positivi.

4.9. Sito I - Depositi lagunari e marini

La prova CPTu è stata eseguita in corrispondenza del lato N della Torre di Pisa. I depositi indagati sono costituiti da sedimenti di ambiente lagunare e/o marino (Olocene-Pleistocene), si tratta di limi, argille e sabbie fini, intercalate a sabbie eoliche costituenti antiche dune costiere. L'area è stata oggetto di ampie ed approfondite indagini geologiche

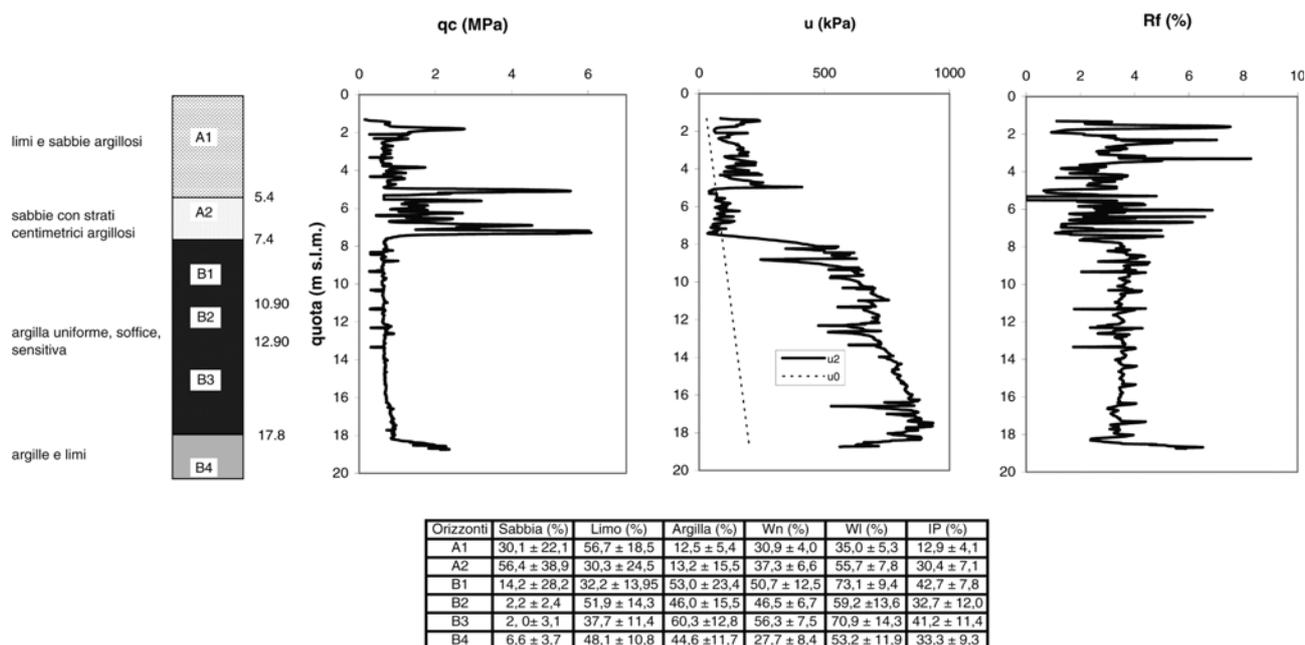


Fig. 10 – Profilo stratigrafico e caratteristiche geotecniche – Sito I. qc: resistenza alla punta; fs: attrito laterale locale; Rf: rapporto delle resistenze ($fs/qc \cdot 100$). La tabella riporta le granulometrie e i limiti di Atterberg degli orizzonti del sito I (valori medi e deviazioni standard): Wn: Wn: contenuto in acqua naturale; Wl: limite liquido; IP: indice di plasticità.

Fig. 10 – Soil profile and geotechnical characteristics – Site I. qc: cone resistance; fs: sleeve friction; Rf: friction ratio ($fs/qc \cdot 100$). Grading and index properties of main soil layers of site I (mean values and standard deviations): Wn: natural water content; Wl: liquid limit; IP: plasticity index.

e geotecniche descritte in numerosi lavori (si veda ad esempio LO PRESTI *et al.*, 2002; VIGGIANI e PEPE, 2006). Procedendo dal piano campagna (posto alla quota di 3 m s.l.m.) verso il basso si incontrano tre “complessi” aventi caratteristiche geotecniche distinte:

- terreno di riporto argilloso-limoso (+3 ÷ 0 m s.l.m.);
- complesso A: sabbie, limi e argille con stratificazioni irregolari limitata continuità laterale (depositi di estuario). Si riconosce un livello A1 (0 ÷ 5.40 m s.l.m.) costituito da limo e sabbia e un livello A2 (-3 ÷ -5.4 m s.l.m.) composto da sabbia mediamente addensata (-5.4 ÷ -7.4 m s.l.m.).
- complesso B: argille poco consistenti con intercalato uno strato sabbioso. In particolare si riconoscono:
 - Argilla Superiore (Pancone) (-7.4 ÷ -17.80 m s.l.m.) (livelli B1, B2 e B3): argilla di alta plasticità, di bassa consistenza e sensitiva;
 - Argilla e Sabbia Intermedia (-17.80 ÷ -24.40 m s.l.m.) (livelli B4 e B5);
 - Argilla Inferiore (-24.4 ÷ -37 m s.l.m.) (livelli B6, B7, B8, B9);
- complesso C: sabbie ben addensate (-37 ÷ -57 m s.l.m.).

La prova CPTu ha attraversato l'orizzonte A e parzialmente quello B (B1, B2, B3 e B4) (Fig. 10).

La resistenza q_c e la pressione u presentano un andamento nettamente distinto nei complessi A e B: la q_c ha un andamento irregolare nel complesso A, dove è ben distinguibile il livello A2 caratterizzato da una resistenza alla punta maggiore di 6 MPa e da bassi valori della u . Nel Pancone, caratterizzato da argille di consistenza ridotta la prova CPTu ha misurato valori di q_c costanti (circa 1 MPa) e di u maggiori di 600 kPa.

5. Interpretazione stratigrafica da prove CPT

Nei siti in cui si disponevano di prove CPT (A, B e E) sono state utilizzate le carte di classificazione di BEGEMANN [1965], SCHMERTMANN [1978] e SEARLE [1979] al fine di ottenere il profilo stratigrafico del sottosuolo e di confrontarlo con quello del sondaggio (semplificato secondo i tipi di suolo proposti dai citati autori).

Nel sito A il metodo di Schmertmann appare quello con una maggiore correlazione con la stratigrafia desunta in maniera diretta dal sondaggio (Fig. 11, Tab. II-IV) con una percentuale di successo del 78 % nell'individuazione delle torbe. Tutte

Tab. II – Percentuali di successo per CPT – (metodo BEGEMANN, 1965). Tra parentesi sono riportate le classi di comportamento del terreno (SBT).

Tab. II – Success rate for CPT – (method of BEGEMANN, 1965). Between brackets the soil behaviour type (SBT).

SITO	Torba (1)	Sabbia/sabbia ghiaiosa (6)	Argilla/loam (3)	Sabbia limosa (5)	Argilla, limo e sabbia (4)
A	78	0	-	-	-
B	67	0	0	0	12
E	-	-	-	0	6

Tab. III – Percentuali di successo per CPT – (metodo SCHMERTMANN, 1978). Tra parentesi sono riportate le classi di comportamento del terreno (SBT).

Tab. III – Success rate for CPT – (method of SCHMERTMANN, 1978). Between brackets the soil behaviour type (SBT).

SITO	Argille organiche e terreni misti (1)	Sabbia (6)	Argille limose e sabbiose (3)	Limi e sabbie argillose (4)	Terre limo-sabbiose (5)
A	78	45	-	-	-
B	78	0	0	14	12
E	-	-	-	8	6

Tab. IV – Percentuali di successo per CPT – (metodo SEARLE, 1979). Tra parentesi sono riportate le classi di comportamento del terreno (SBT).

Tab. IV – Success rate for CPT – (method of SEARLE, 1979). Between brackets the soil behaviour type (SBT).

SITO	Argille organiche e terreni misti (1)	Sabbia (9)	Argille limose e sabbiose (5)	Limi e sabbie argillose (6)	Terre limo-sabbiose (7)	Sabbia limosa argillosa (7)	Sabbia (10)
A	0	9	-	-	-	-	-
B	0	-	17	28	14	0	0
E	-	-	0	13	-	0	-

le carte di classificazione consentono una chiara individuazione del passaggio stratigrafico da depositi torbosi a sabbie. Tuttavia è necessario sottolineare che la stratigrafia di riferimento manca di dettaglio ed è stata ottenuta in una verticale prossima al sito indagato. Alla luce di questa osservazione, la classificazione ottenuta con il metodo di Searle appare più coerente con la storia geologica del deposito e con la possibile alternanza di lenti di argilla organica e di argilla limosa. In ogni caso vale la pena rimarcare che la carta di classificazione di Searle contiene un numero maggiore di classi.

Anche per il sito B i metodi utilizzati conducono a differenti profili stratigrafici (Fig. 12). Le indagini di laboratorio identificano uno strato superficiale più scadente con elevato limite liquido e indice plastico, sostanza organica sino al 50%, bassa permeabilità, elevato indice dei vuoti e compressibilità. Tale strato si estende sino alla profondità massima di circa 4 m. Al di sotto di esso si hanno granulometrie miste (prevalentemente limi misti ad argilla e sabbia) con caratteristiche meccaniche migliori. I diversi metodi di classificazione non sono in grado di discriminare lo strato superiore prevalentemente torboso da quello sottostante prevalentemente limoso. Inoltre la presenza delle sabbie e sabbie li-

mose che il sondaggio individua a circa 10-11 m di profondità è segnalata a profondità inferiori (circa 7-8 m). Vale la pena sottolineare come le torbe e le argille organiche presentino una elevata percentuale di identificazione corretta mentre le altre classi (prevalentemente limi) non sono quasi mai identificate correttamente (Tabb. II-IV).

Nel sito E i risultati delle interpretazioni con le carte di classificazioni utilizzate non sono soddisfacenti se confrontati con i risultati del sondaggio (Fig. 13) ed in particolare non viene in alcun modo rilevato il passaggio a sabbie limose a 3.3 m. Sono state identificate anche argille organiche (da 0.60 a 0.80 m e da 1.80 a 2.40 m), la cui presenza è confermata anche dalle prove di laboratorio. Vale la pena sottolineare che i terreni in oggetto sono prevalentemente limi.

In conclusione è possibile affermare che nessuno dei metodi disponibili è completamente soddisfacente. Il metodo di Searle ha le percentuali di successo più basse, tuttavia nella maggior parte dei casi la classificazione ricade in classi "attigue" o di materiali simili e quindi in errore si ma non così grave.

Tutti i metodi cadono in difetto soprattutto in presenza di terreni intermedi tra sabbie e argille

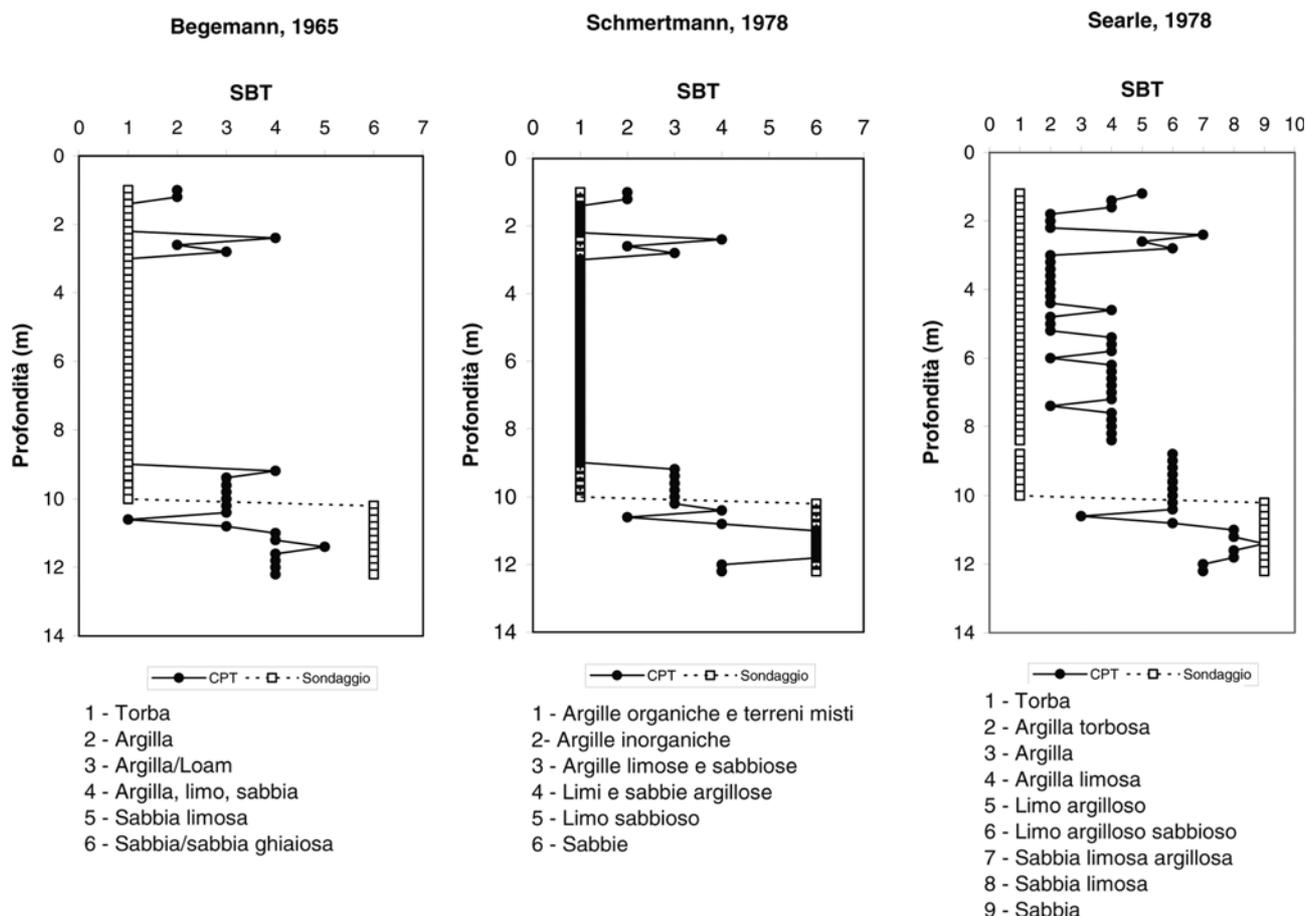


Fig. 11 – Sito A: Correlazioni tra profilo stratigrafico da sondaggio (reinterpretato secondo le classi di comportamento del terreno proposte dalle varie carte di classificazione) e quello ottenuto dall'interpretazione di prove CPT. SBT: classi di comportamento del terreno.

Fig. 11 – Site A: Comparison between stratigraphical profile of the borehole (reinterpreted in relation with the soil behaviour type classes of the classification chart) and that obtained through CPT tests. SBT: soil behaviour type.

come i limi-sabbiosi o le sabbie limose con modeste resistenze alla punta che non vengono correttamente classificati.

6. Interpretazione stratigrafica da prove CPTU

Nei siti dove si disponeva di prove CPTU l'interpretazione stratigrafica è stata ottenuta utilizzando i metodi proposti da ROBERTSON *et al.*, [1986]; ROBERTSON, [1990] e ESLAMI e FELLENIUS, [1997]; successivamente è stata confrontata con quella del sondaggio. Nell'utilizzare le carte proposte da Robertson si è evitato di utilizzare il parametro B_q poiché nella maggior parte dei siti la penetrazione avviene spesso in condizioni di parziale saturazione.

6.1. Sito B

Nel sito B la stratigrafia ricavata dalla prova CPTU con il metodo di ROBERTSON *et al.* [1986] è in miglior accordo con i dati del sondaggio. In parti-

colare viene identificata la presenza di argille organiche sino a 3.5 m di profondità, un'alternanza di terreni organici e argille da -3.5 a -6.5 m; da questa profondità a -11 m si hanno argille limose, limi argillosi e limi sabbiosi. Intercalati a questi depositi a 8 m e a 9.3 m le prove CPTU identificano livelli decimetrici di limi sabbiosi/sabbie limose. A profondità superiori a 11 m si passa a sabbie (Fig. 14).

Il metodo di ROBERTSON [1990] fornisce una stratigrafia paragonabile a quella ottenuta dalle prove CPT. Dalla superficie a -6.5 m si hanno alternanze di argilla e terreno organico che passano quindi ad alternanze di argilla e limi argillosi fino a -11 m. Anche in questo caso le prove CPTU evidenziano uno strato sabbioso a -7.7 m ed uno strato di limo sabbioso a circa 9.3 m.

Il metodo di ESLAMI e FELLENIUS [1997] individua una successione stratigrafica simile a quella ricavata dalle prove CPT ma con classi in parte differenti. Precisamente, è possibile identificare argille e limi fino a -6.5 m per passare poi ad alter-

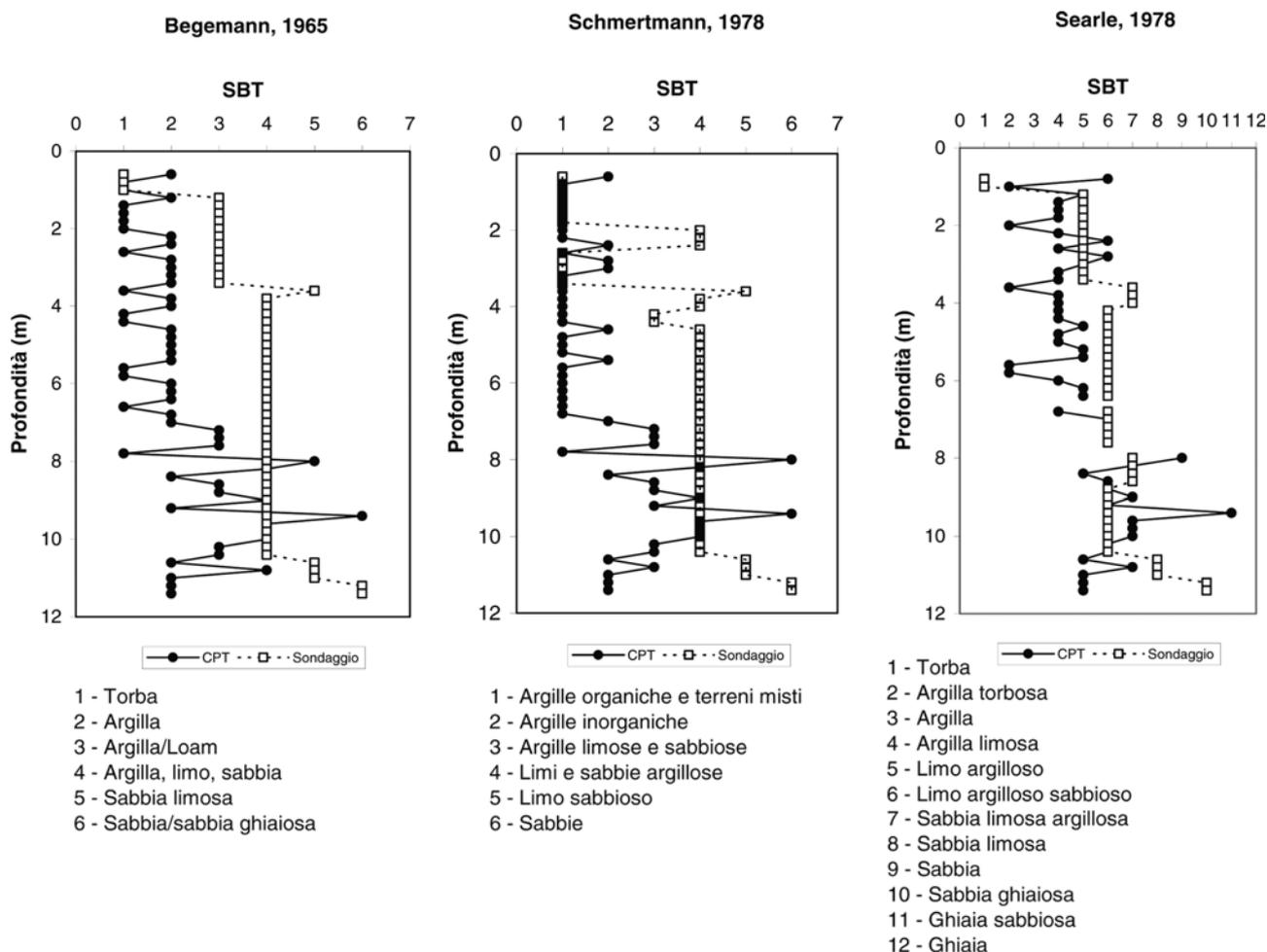


Fig. 12 – Sito B: Correlazioni tra profilo stratigrafico da sondaggio (reinterpretato secondo le classi di comportamento del terreno proposte dalle varie carte di classificazione) e quello ottenuto dall’interpretazione di prove CPT. SBT: classi di comportamento del terreno.

Fig. 12 – Site B: Comparison between stratigraphical profile of the borehole (reinterpreted in relation with the soil behaviour type classes of the classification chart) and that obtained through CPT tests. SBT: soil behaviour type.

nanze di argille e limi con argille limose e limi argillosi fino a -9.8 m. Ugualmente ai metodi precedenti, sono distinguibili due strati sabbiosi a -7.7 e -9.3 m. A profondità superiori a 11 m vengono identificate le sabbie.

L’interpretazione delle prove penetrometriche con piezocono (CPTu) è stata ripetuta filtrando i valori di resistenza alla punta e laterale, la pressione neutra con il metodo di VIVATRAT [1979] (Fig. 14). Il filtraggio di Vivatrat prevede la scelta dei parametri D (spessore) e A (ampiezza) in funzione, rispettivamente, dello spessore degli strati dell’area indagata e dell’incisività dell’azione di filtraggio. Nel caso specifico sono stati eseguiti due tentativi con gli spessori D di 50 cm e 100 cm. Al parametro A sono stati assegnati i valori di 1 (filtraggio più incisivo) e 1.5 (filtraggio meno incisivo), eseguendo due diversi filtraggi per ciascuno spessore D. Il metodo di ROBERTSON *et al.* [1986], in virtù del filtraggio (D = 0.5 m) evidenzia ancora più chiaramente a -3.7 m un passaggio da terreni organici ad argilla, che per

i dati non filtrati non risultava così evidente. Il profilo ottenuto risulta in miglior accordo con la stratigrafia del sondaggio e le indagini di laboratorio. Resta netto il passaggio a -6.5 m, mentre l’azione del filtraggio tende a rendere meno pronunciati i picchi che corrispondono ai livelli limosi e sabbiosi di -8 m e -9.3 m (Fig. 14).

Analizzando nel dettaglio le litologie proposte dai vari metodi di interpretazione e facendo un confronto con il sondaggio si può notare che nessun metodo fornisce un’identificazione completamente corretta dal punto di vista litologico del terreno attraversato.

Il metodo di ROBERTSON *et al.* [1986] interpreta correttamente il 100% della classe terreni organici (SBT = 2), ma identifica solo il 20% della classe “da limi argillosi a limi sabbiosi” (SBT = 5 e 6) e non identifica la classe “da limi sabbiosi a sabbie limose” (SBT = 7) che viene invece interpretata come sabbie. Il metodo di ROBERTSON [1990] non ha dato significative percentuali di successo. Il metodo di

Tab. II – Caratteristiche geologiche dei siti esaminati.
 Tab. II – Geological characteristics of the test sites.

Sito	Litotipo	Ambiente di deposizione	Soggiacenza superficie piezometrica* (m)
A	Sabbie, argille, torbe	Pianura costiera	0
B	Estremamente eterogeneo	Fluviale-lacustre	0.5 (falda superficiale) 3.25 (falda profonda)
C	Sabbie con ciottoli, alternanze di limi sabbiosi e sabbie limose	Fluviale (depositi alluvionali terrazzati)	3
D	Sabbie, limi sabbiosi	Fluviale	5.7
E	Argilla limosa, limi argillosa	Fluviale (depositi alluvionali terrazzati)	9.5
F	Argilla limosa, limi argillosa	Fluviale (conoide alluvionale)	1-2 (falda sospesa) >19 (falda semi-confinata)
G	Argilla limosa	Fluviale (depositi alluvionali terrazzati)	>20
H	Argilla	Fluviale (depositi alluvionali terrazzati)	4.5-6.5 (falda sospesa) 20 (falda nel substrato marino)
I	Limi, argille e sabbie fini	Lagunare/marino	1.5-2 (falda freatica nel complesso A) 0.7 (falda confinata nell'orizzonte B3) 1.5 (falda confinata nell'orizzonte C)

* I valori si riferiscono alla data di esecuzione delle prove in sito e dei sondaggi geognostici.

ESLAMI e FELLENIUS [1997] non identifica argille e limi mentre riconosce quasi il 20% di argille limose e limi argillosi (SBT = 5). La percentuale scende sotto il 5% per i limi sabbiosi e le sabbie limose. Queste litologie vengono infatti interpretate come più fini.

Nonostante a livello litologico e granulometrico non ci sia un'esatta corrispondenza i metodi utilizzati sono in grado di identificare correttamente i limiti stratigrafici corrispondenti a cambiamenti litologici o a comportamenti geotecnici differenziati del materiale (6.5 m, 11 m), anche nel caso in cui questi corrispondono a strati di spessore ridotto (es. limi e sabbie tra 7.3 e 7.7 m). Il filtraggio può essere d'aiuto nell'identificare tali limiti stratigrafici.

Le differenze in termini di q_c ed f_s tra punta meccanica e piezocono sono mostrati in figura 15. Le differenze osservate sono modeste e in linea con quanto riportato nell'introduzione. In particolare vale la pena rimarcare che l'attrito laterale misurato con la punta meccanica è sempre superiore a quello ricavato dalle misure col piezocono.

6.2. Sito C

L'interpretazione della prove CPTu con i tre metodi considerati è riportata in figura 16. Si os-

servano variazioni repentine (centimetriche) di classificazione con tutti i metodi che tuttavia consentono di discriminare lo strato superficiale sabbioso sino a circa 3.2 m. I sottostanti limi sabbiosi che raggiungono la profondità di 4.6 m non sono classificati correttamente. La successiva alternanza di sabbie limose e argille limose con rari straterelli di materiale organico che termina a circa 12 m al tetto delle sabbie e ghiaie è sostanzialmente individuata. La presenza dei livelli torbosi è colta sia dal metodo ROBERTSON *et al.* [1986] che da ROBERTSON [1990].

Con il metodo di ROBERTSON *et al.* [1986] le sabbie rilevate da 0 a 3.2 m dovrebbero interamente essere interpretate come classe 9, ma solo una percentuale molto ridotta (<10%) viene correttamente identificata. La restante parte dello strato viene interpretata con classi variabili da sabbie limose ad argille. L'applicazione del filtraggio non contribuisce a migliorare la percentuale di successo. Da 4.6 m a fine prova il sondaggio identifica terreni che dovrebbero essere interpretati come limi argillosi o sabbiosi (classi 5 e 6). In questo caso la percentuale di successo migliora notevolmente, raggiungendo l'85% per l'interpretazione eseguita sulla base dei dati filtrati con $D=1$ e $A=1$.

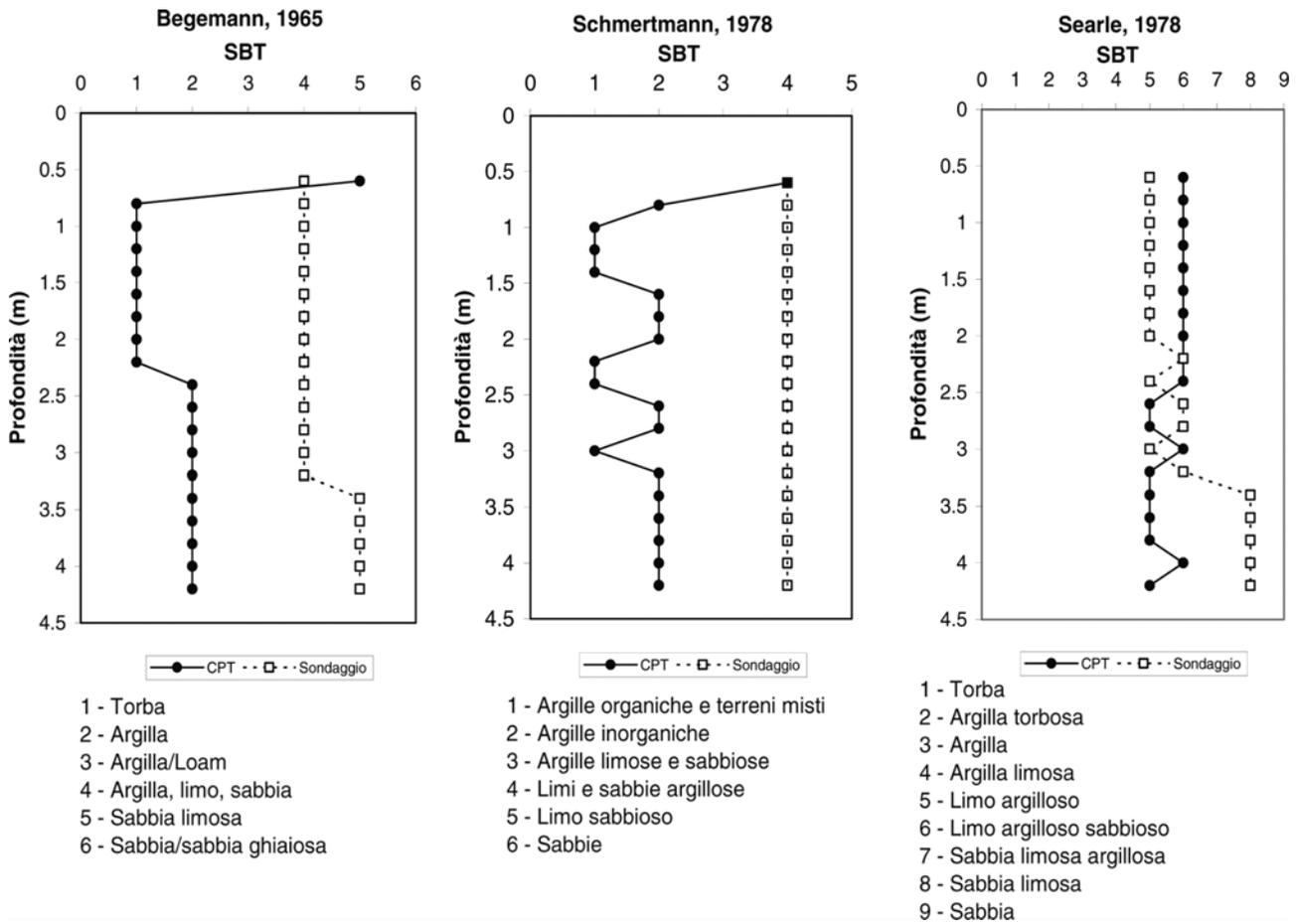


Fig. 13 – Sito E: Correlazioni tra profilo stratigrafico da sondaggio (reinterpretato secondo le classi di comportamento del terreno proposte dalle varie carte di classificazione) e quello ottenuto dall’interpretazione di prove CPT. SBT: classi di comportamento del terreno.

Fig. 13 – Site E: Comparison between stratigraphical profile of the borehole (reinterpreted in relation with the soil behaviour type classes of the classification chart) and that obtained through CPT tests. SBT: soil behaviour type.

Le percentuali di successo ottenute con il metodo di ROBERTSON [1990] evidenziano un miglioramento per i dati filtrati, in particolare con D uguale ad 1 e A uguale ad 1 (Fig. 17). Sulla base del sondaggio lo strato di sabbia superficiale dovrebbe essere individuato dalla classificazione utilizzata come classe 6, ma ciò si realizza solo nel 20% dei casi per i dati non filtrati e nel 50% dei casi per i dati filtrati. Anche in questo caso lo strato da 3.2 a 4.6 m presenta percentuali di successo minime in quanto le interpretazioni propongono in buona parte terreni argillosi o sensitivi. Le percentuali di successo migliorano sensibilmente da 4.6 m a fine prova, ma si mantengono su valori inferiori rispetto a ROBERTSON *et al.* [1986].

Per entrambi i metodi di Robertson è necessario evidenziare che le elevate percentuali di successo (>70%) da 4.6 m a fine prova possono essere favorite dall’attribuzione di due classi (4 e 5) alle litologie del sondaggio. Non è infatti possibile distinguere tra limi argillosi e sabbiosi in quanto il son-

daggio non fornisce le profondità a cui si hanno i contatti stratigrafici tra le due litologie.

Il metodo di Eslami e Fellenius presenta in generale basse percentuali di successo.

Il filtraggio dei dati (Fig. 17) comporta quindi talora un miglioramento significativo nell’interpretazione. Si evidenzia la divisione dei dati in quattro distinti gruppi: a) lo strato superficiale (0-3.20 m) presenta elevati valori di resistenza, b) lo strato tra 3.20 e 4 m è caratterizzato da valori di q_e/q_t decisamente bassi (terreni sensitivi) ed è meno evidente nella classificazione di ROBERTSON [1990], c) lo strato tra 4 m e 10.4 m è classificato come limo argilloso-limo sabbioso da ESLAMI e FELLENIUS [1997], come “da argille limose a limi argillosi” e “da limi argillosi a limi sabbiosi” da ROBERTSON *et al.* [1986] e “da argille ad argille limose” – “da argille limose a limi argillosi” da ROBERTSON [1990]; d) un numero ridotto di punti presenta alte resistenze che sono da collegare al passaggio a sabbie e ghiaie a 10.4 m.

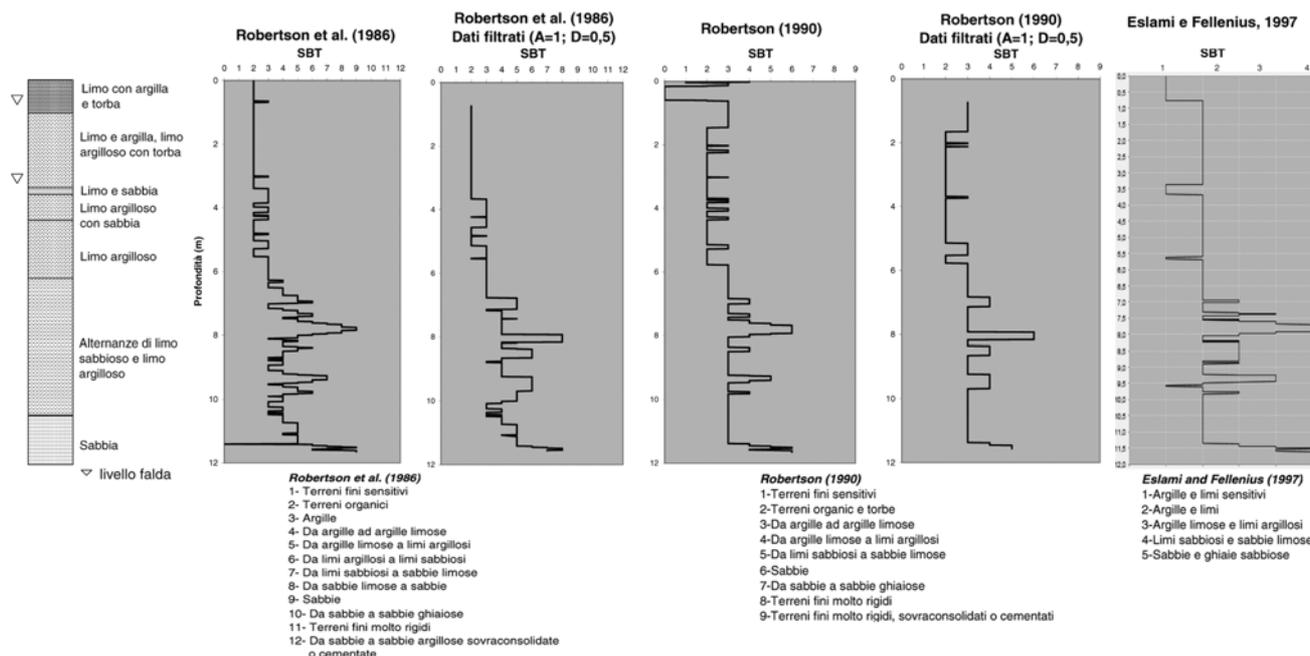


Fig. 14 - Sito B: Correlazioni tra profilo stratigrafico da sondaggio e quello ottenuto dall'interpretazione di prove CPTu. SBT: classi di comportamento del terreno; D: spessore dei sottostrati; A: coefficiente che definisce l'ampiezza del semi-intervallo considerato accettabile per i valori assunti dalle misure (dati filtrati con il metodo di VIVATRAT [1979]).

Fig. 14 – Site B: Comparison between stratigraphical profile of the borehole and those obtained through CPTu tests. SBT: soil behaviour type ; D: sublayer thickness ; A: coefficient representing the width of the half-interval acceptable for the measure values (Vivatrat filtering method [1979]).

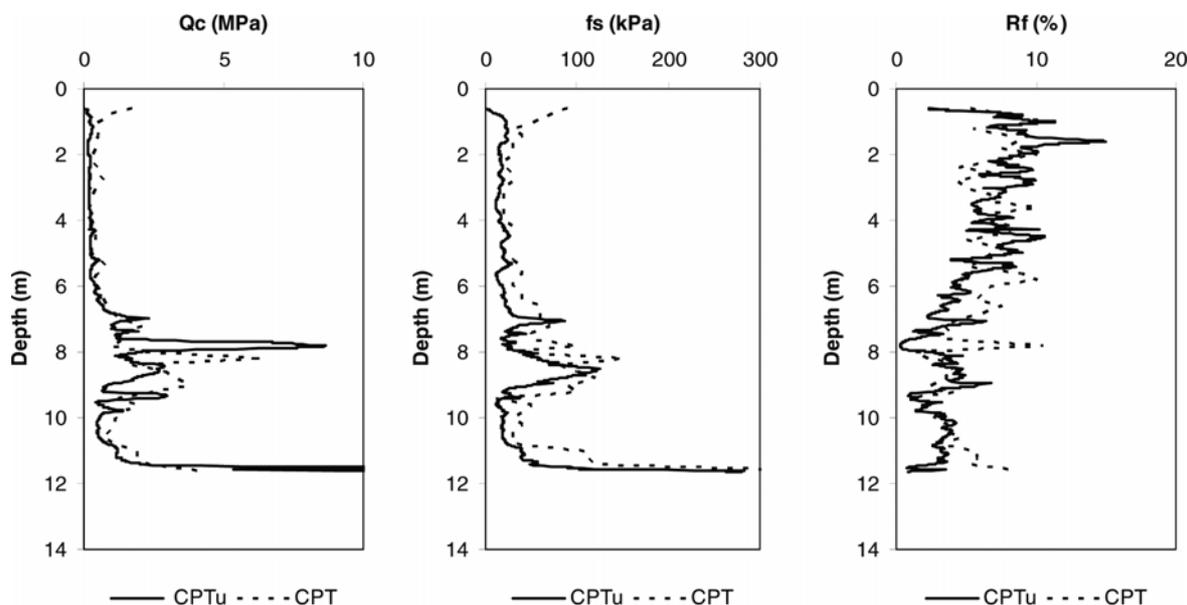


Fig. 15 – Sito B - Correlazione tra i parametri misurati da prove CPT e quelli misurati da prove CPTu.

Fig. 15 – Site B – Comparison between parameters measured with CPT and with CPTu.

6.3. Sito D

I tre metodi di classificazione utilizzati propongono risultati paragonabili che portano ad osservare come la prova CPTu dia buoni risultati nell'interpretazione stratigrafica relativa a terreni omogenei. Lo strato argilloso presente da 5 a 5,90 m e so-

prattutto le sabbie fini presenti sino a fine prova (30 m) sono identificati correttamente (Fig. 18).

La percentuale di successo nell'identificazione litologica si riduce notevolmente per i terreni superficiali costituiti da alternanze di argille limose, limi argillosi e sabbie limose. Gli strati limosi e argillosi cadono in prevalenza nei campi dei limi sabbiosi e

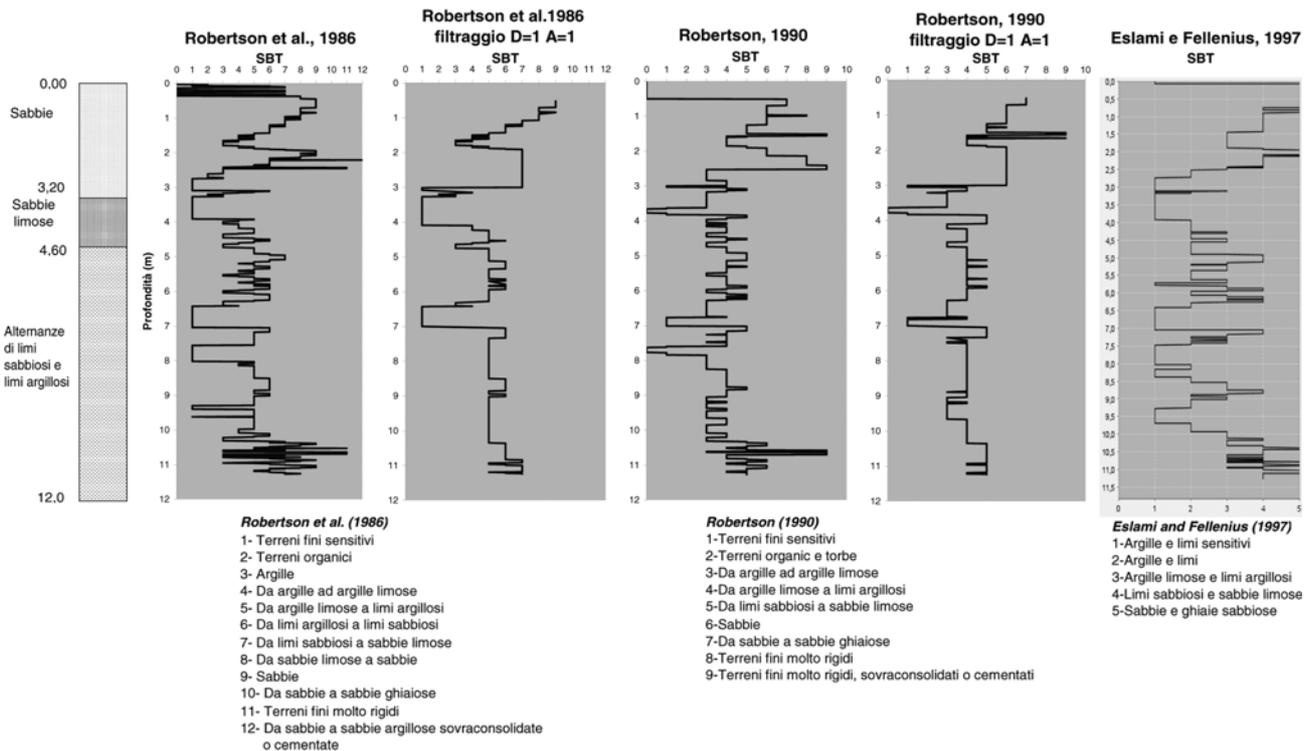


Fig. 16 – Sito C: Correlazioni tra profilo stratigrafico da sondaggio e quello ottenuto dall’interpretazione di prove CPTu. SBT: classi di comportamento del terreno.

Fig. 16 – Site C: Comparison between stratigraphical profile of the borehole and those obtained through CPTu tests. SBT: soil behaviour type.

gli strati sabbiosi cadono nei campi delle argille limose/limi argillosi.

6.4. Sito E

Le prove CPTu effettuate utilizzando differenti fluidi di saturazione non presentano significative variazioni nell’interpretazione stratigrafica (Fig. 19). Il metodo di ESLAMI e FELLENIUS [1997] fornisce in generale risultati poco soddisfacenti e la percentuale di terreni identificati correttamente dal punto di vista litologico risulta molto ridotta. Lo strato di terreno limoso-argilloso (0-2 m) è infatti identificato prevalentemente come sabbia limosa/limo sabbioso. Il resto dei terreni cadono nel campo 2 che corrisponde ad argille o limi al posto di limi argillosi o sabbiosi e sabbie limose descritti nel sondaggio.

Il metodo di ROBERTSON *et al.* [1986] ed il metodo di ROBERTSON [1990] forniscono risultati simili con i terreni da 2.10 a 4.25 m che cadono interamente nel campo delle argille; non vengono quindi identificati né i limi sabbiosi né le sabbie limose. Lo strato superficiale limoso-argilloso (0-0.6 m) viene identificato come limo sabbioso/sabbia limosa da ROBERTSON *et al.* [1986] e come sabbia da ROBERTSON [1990]. I limi argillosi rilevati dal sondaggio tra 0.6 m e 2.1 m si distribuiscono in numerosi campi a causa dell’elevata variabilità delle resistenze incontrate a queste profondità, con una certa prevalenza delle argille.

I passaggi litologici non vengono identificati correttamente. La variabilità nell’interpretazione dello strato da 0 cm a 2.10 m può essere spiegata con la presenza di uno strato parzialmente saturo che comporta un aumento delle resistenze, particolarmente evidente nella classificazione ottenuta con il metodo di ROBERTSON [1990].

6.5. Sito F

In tutti i metodi di interpretazione il terreno di riporto superficiale (0-0.75 m) si distribuisce in numerosi campi, in modo irregolare, in relazione all’eterogeneità del materiale.

Nella prova eseguita nel periodo umido (CPTu1) nel grafico di ESLAMI e FELLENIUS [1997] i restanti strati si concentrano nel campo “argille o limi” e solo una parte ridotta dei punti cade nel campo corretto “argille limose o limi argillosi”. Bisogna però sottolineare che la maggioranza dei punti si colloca molto vicino alla linea di separazione dei due campi citati. Di conseguenza i risultati della classificazione possono ritenersi parzialmente accettabili se paragonati al sondaggio (Fig. 20). Non viene identificato lo strato di limo sabbioso (2.45-2.65 m), probabilmente a causa del suo ridotto spessore [VREUGHDENHIL *et al.*, 1994]. Le considerazioni sopra esposte possono essere estese al metodo di ROBERTSON *et al.* [1986]. Nella carta di classificazione di ROBERTSON



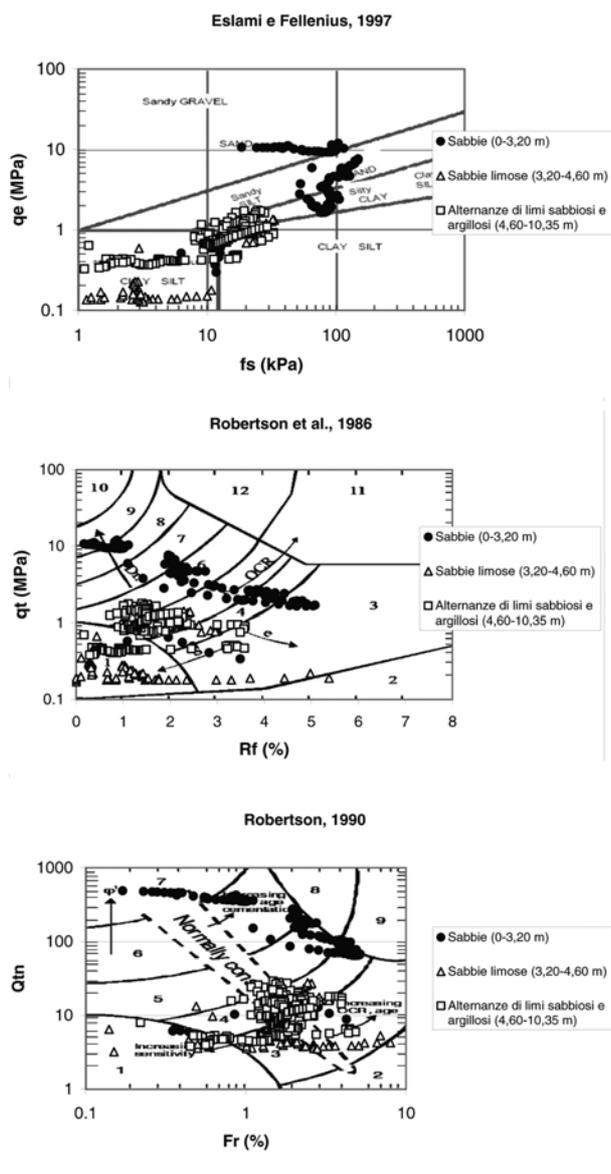


Fig. 17 – Sito C: Carte di classificazione – dati filtrati ($D=1$; $A=1$). La descrizione delle classi SBT è riportata in Fig.16.

Fig. 17 – Site C: Classification charts – filtered data. See Fig. 16 for the description of the SBT classes.

[1990] i terreni fino alla profondità di 1.60 m cadono nei campi dei suoli rigidi (campi 8 e 9).

Nella prova eseguita nel periodo secco (CPTu2) nel grafico di ESLAMI e FELLENIUS [1997] i terreni da 0.75 a 1.10 m vengono classificati come limi sabbiosi, da 1.10 a 2.30 m come limi argillosi e da 2.30 m a fine prova come argille o limi. Rispetto alla prova eseguita a giugno si può notare una variazione della classificazione tra 0.75 e 2.30 m dovuta ad un aumento delle resistenze, legato all'essiccamento del terreno. Quanto evidenziato per il metodo di ESLAMI e FELLENIUS [1997], si ripete in misura minore per il metodo di ROBERTSON *et al.* [1986], in

base al quale i terreni tra 0.75 e 1.20 m sono classificati come limi argillosi/limi sabbiosi e i restanti terreni sono classificati come argille. La classificazione di ROBERTSON [1990] tende invece a differenziarsi rispetto alle precedenti, con una importante presenza di terreni fini molto rigidi, probabilmente correlati all'essiccamento dei terreni testati (Fig. 20).

6.6. Sito G

La percentuale di successo è elevata ($>70\%$) per i terreni situati a profondità maggiore di 1.2 m utilizzando i metodi di ROBERTSON *et al.* [1986] e ESLAMI e FELLENIUS [1997]. In particolare nella carta di classificazione di ESLAMI e FELLENIUS [1997] i limi argillosi (1.20-1.90 m) e le argille limose (1.90-3.30 m) cadono correttamente nella classe SBT “argille limose o limi argillosi” (Fig. 21); in quella di ROBERTSON *et al.* [1986] si concentrano nel campo 3 (argille) e nel campo 4 (argille limose), mostrando una leggera tendenza alla sottostima della granulometria rispetto a quanto risulta dalle prove granulometriche di laboratorio.

Le argille limose più superficiali (0-1.20 m) presentano un andamento irregolare in tutti i metodi utilizzati e non vengono correttamente identificate, ciò può essere messo in relazione all'effetto che l'essiccamento del terreno produce sulle resistenze misurate dal penetrometro (la prova CPTu è stata eseguita in un periodo secco).

Il metodo di ROBERTSON [1990] ha scarse percentuali di successo: l'argilla limosa superficiale viene identificata come sabbia, mentre i restanti strati cadono nei campi 8 e 9 (terreni fini molto rigidi).

Le classificazioni utilizzate non riescono ad identificare il passaggio litologico tra limi argillosi e argille limose.

6.7. Sito H

L'interpretazione della prova fornisce risultati in buona parte corretti e presenta una buona percentuale di successo (100%) nell'identificazione litologica utilizzando i metodi di ROBERTSON *et al.* [1986] e di ROBERTSON [1990] ed una discreta percentuale di successo (40-60%) con quello di ESLAMI e FELLENIUS [1997]. Le argille limose del sondaggio (0.35-4 m) vengono identificate come “argille o limi” nelle carte di classificazione di ROBERTSON *et al.* [1986] e di ESLAMI e FELLENIUS [1997] (Fig. 22), come “argille e argille limose” in quella di ROBERTSON [1990].

Le prove CPTu1 e CPTu2 effettuate in differenti periodi e con diversi fluidi di saturazione della punta non mostrano significative differenze nell'interpretazione stratigrafica (Fig. 22).

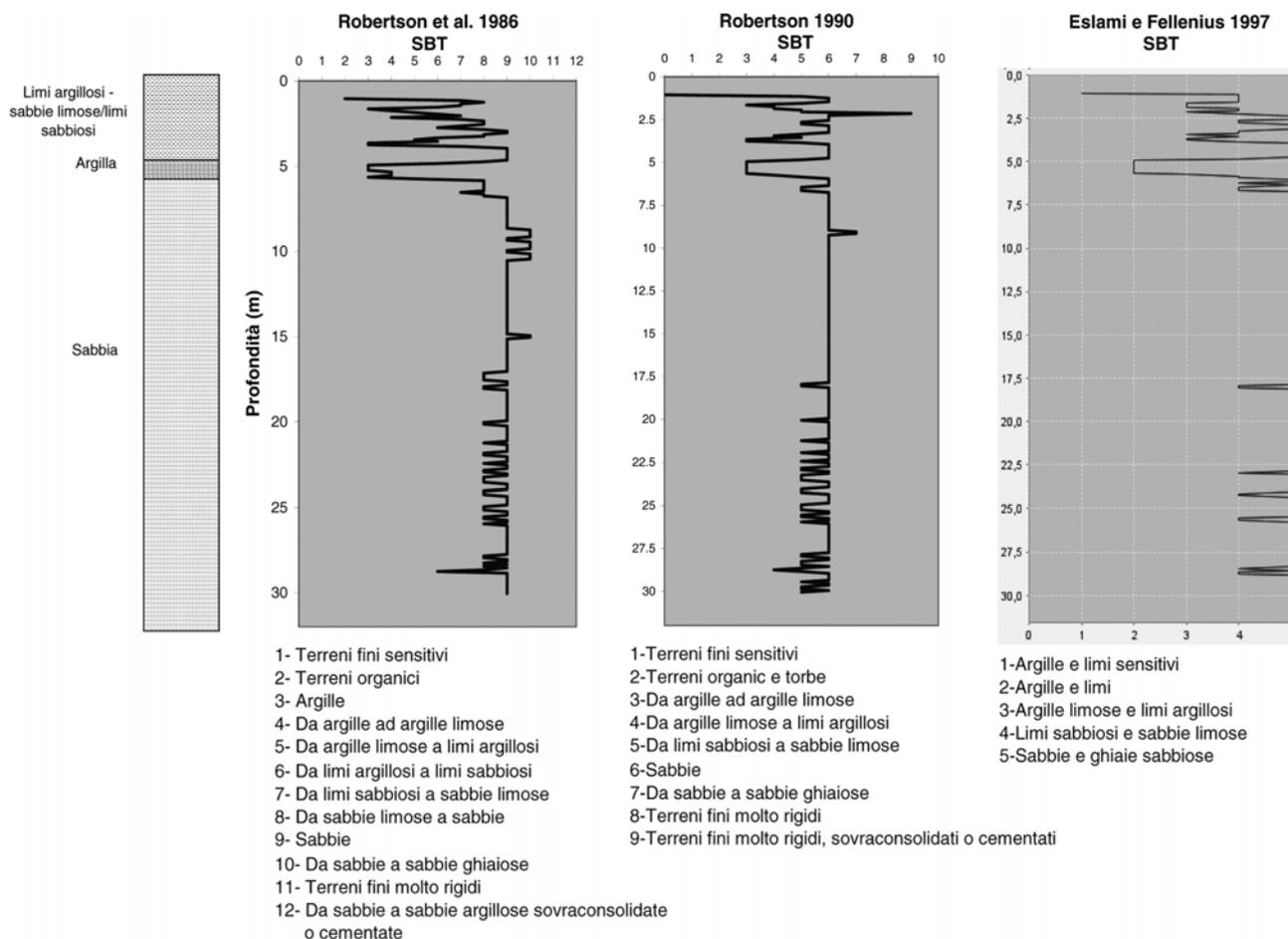


Fig. 18 – Sito D: Correlazioni tra profilo stratigrafico da sondaggio e quello ottenuto dall’interpretazione di prove CPTu. SBT: classi di comportamento del terreno.

Fig. 18 – Site D: Comparison between stratigraphical profile of the borehole and those obtained through CPTu tests. SBT: soil behaviour type.

6.8. Sito I

I metodi di classificazione utilizzati non riescono a classificare correttamente il livello A1, che viene identificato come argilla, argilla limosa, limo argilloso; essi tendono a sottostimare di conseguenza la granulometria. Il livello A2 è classificato in numerose classi SBT che vanno dalle argille alle sabbie limose in discreto accordo con la stratigrafia reale (Fig. 23). Percentuali di successo molto elevate (100%) per tutti i metodi sono relative al complesso B (livelli B1, B2, B3) costituito omogeneamente da argilla. Il passaggio stratigrafico tra il complesso A e B viene sempre correttamente identificato.

7. Discussione dei risultati

La verifica in 9 siti italiani, appartenenti a diversi contesti geologici, dell’applicabilità delle principali correlazioni messe a punto in letteratura per

l’interpretazione stratigrafica di prove CPT e CPTu ha portato alle seguenti considerazioni preliminari:

- Le carte di classificazione utilizzate riescono ad identificare correttamente i litotipi incontrati nel caso di depositi omogenei saturi. Le percentuali di successo sono prevalentemente buone nel caso delle argille soffice o argille organiche e delle sabbie, mentre diminuiscono notevolmente nel caso dei terreni intermedi (limi, limi-argillosi e sabbiosi, argille-limose e sabbie fini con limo).
- La presenza di una zona superficiale parzialmente satura (soprattutto nei terreni a grana fine) conduce ad una sovrastima della granulometria del terreno. L’impiego della carta di classificazione di ROBERTSON [1990] tende ad accentuare tale sovrastima.
- La prova CPTu conduce ad una stima migliore del profilo stratigrafico rispetto alla prova CPT. Un miglioramento notevole nella capacità predittiva di alcuni metodi si ha a seguito del filtraggio dei dati.

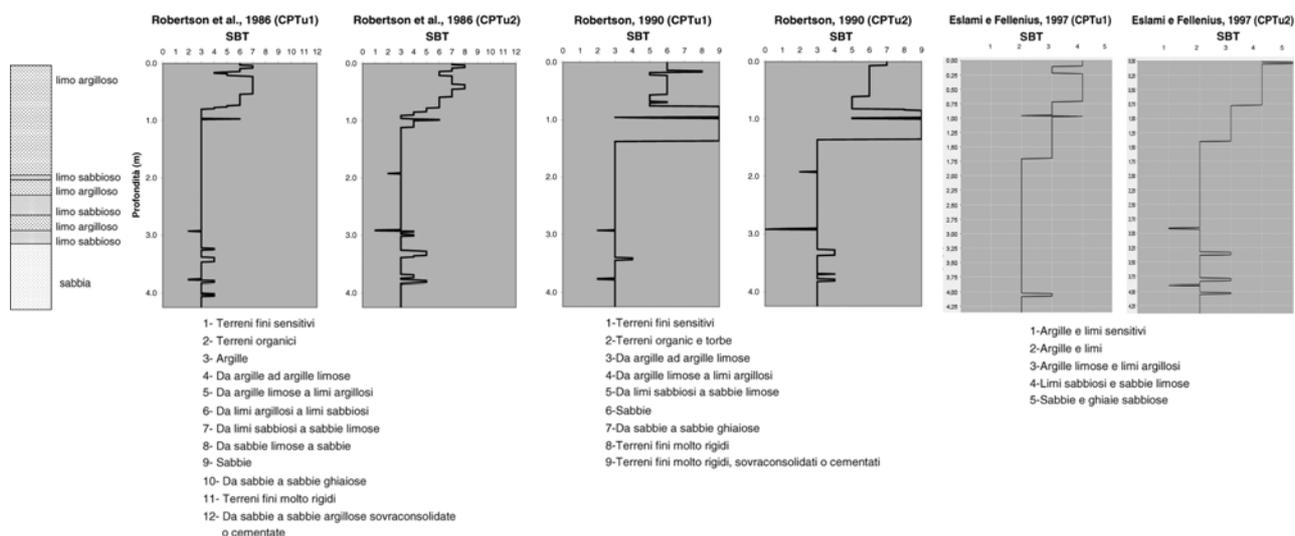


Fig. 19 – Sito E: Correlazioni tra profilo stratigrafico da sondaggio e quello ottenuto dall'interpretazione di prove CPTU. SBT: classi di comportamento del terreno.

Fig. 19 – Site E: Comparison between stratigraphical profile of the borehole and those obtained through CPTu tests. SBT: soil behaviour type.

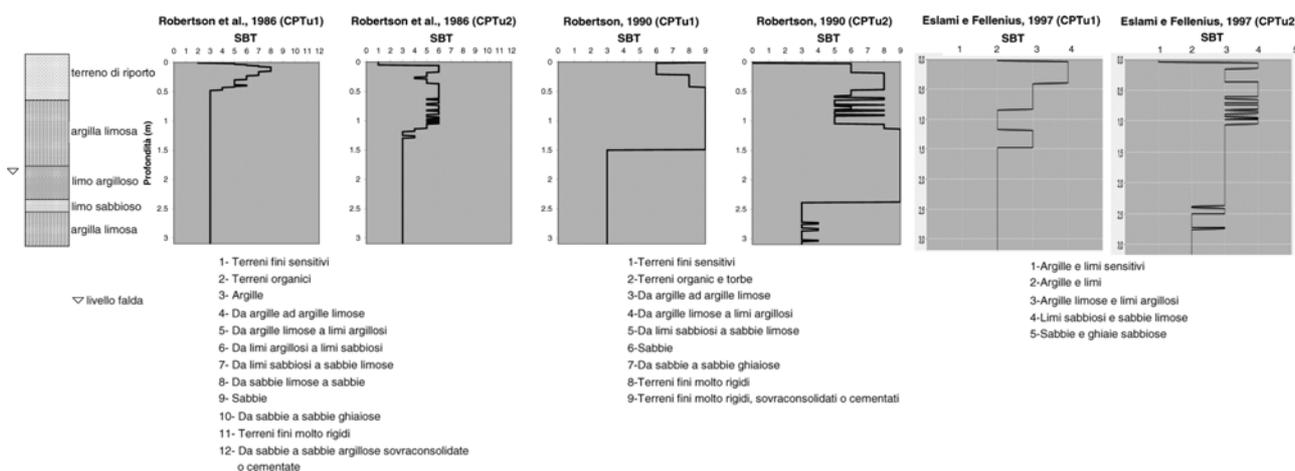


Fig. 20 – Sito F: Correlazioni tra profilo stratigrafico da sondaggio e quello ottenuto dall'interpretazione di prove CPTU. SBT: classi di comportamento del terreno.

Fig. 20 – Site F: Comparison between stratigraphical profile of the borehole and those obtained through CPTu tests. SBT: soil behaviour type.

- In alcuni casi appare problematica l'individuazione di strati sottili anche con l'impiego della prova CPTu.
- I risultati sottolineano che le metodologie di classificazione litologica esistenti in letteratura dipendono strettamente dalle condizioni geologiche dei terreni sui quali sono state messe a punto, non sono perciò applicabili acriticamente. Le prove penetrometriche inoltre necessitano di essere sempre tarate con sondaggi geognostici.
- Per le prove CPT, i metodi di Begemann e soprattutto quello di Schmertmann hanno buone percentuali di successo nel caso di argille tene-

re, argille organiche o sabbie. Il metodo di Searle mostra minori percentuali di successo, tuttavia i litotipi vengono in genere classificati in classi "attigue" o simili per cui il metodo conduce ad errori più accettabili in pratica. La peculiarità del metodo di Searle è quella di basarsi su un numero significativamente maggiore di classi. Con tutti i metodi esaminati vengono comunque identificati correttamente i passaggi stratigrafici.

- Per le prove CPTu, tutti i metodi esaminati consentono una corretta identificazione dei passaggi stratigrafici. Tra i tre metodi considerati,

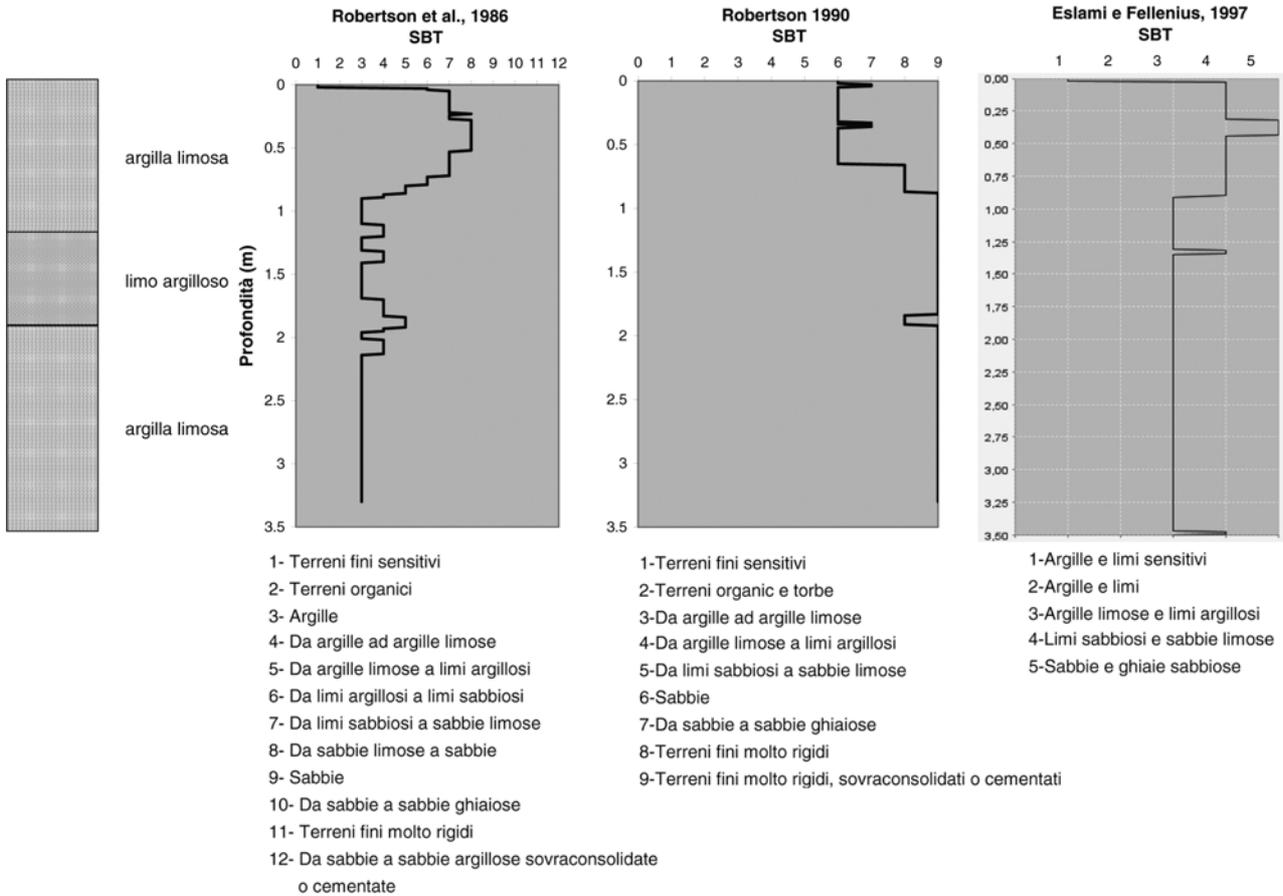


Fig. 21 – Sito G: Correlazioni tra profilo stratigrafico da sondaggio e quello ottenuto dall'interpretazione di prove CPTU. SBT: classi di comportamento del terreno.

Fig. 21 – Site G: Comparison between stratigraphical profile of the borehole and those obtained through CPTu tests. SBT: soil behaviour type.

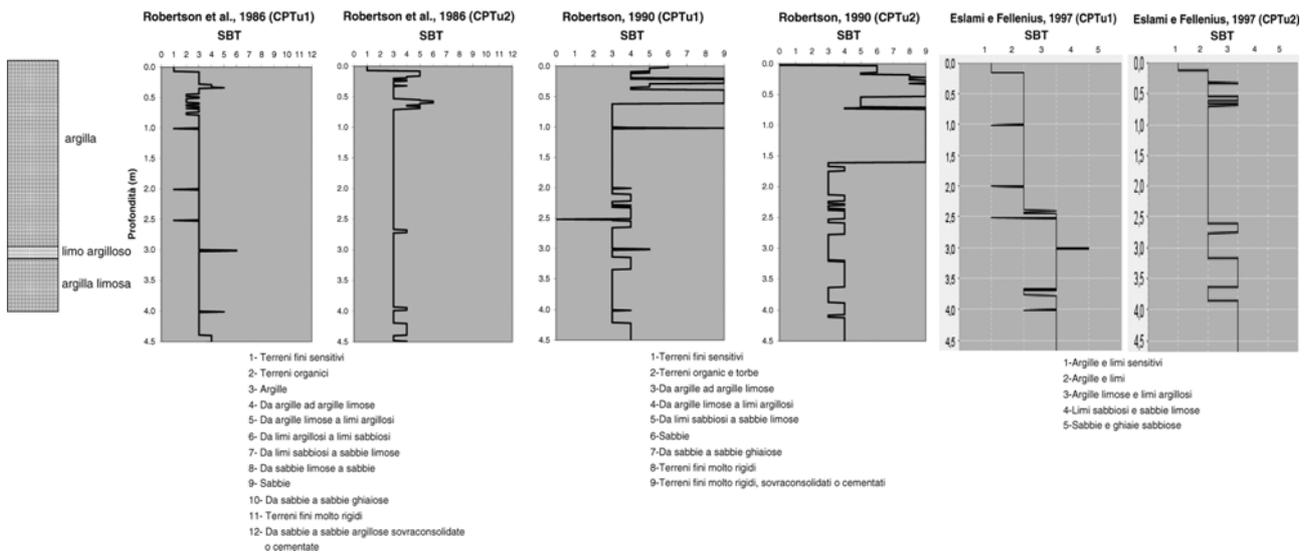


Fig. 22 – Sito H: Correlazioni tra profilo stratigrafico da sondaggio e quello ottenuto dall'interpretazione di prove CPTU. SBT: classi di comportamento del terreno.

Fig. 22 – Site H: Comparison between stratigraphical profile of the borehole and those obtained through CPTu tests. SBT: soil behaviour type.

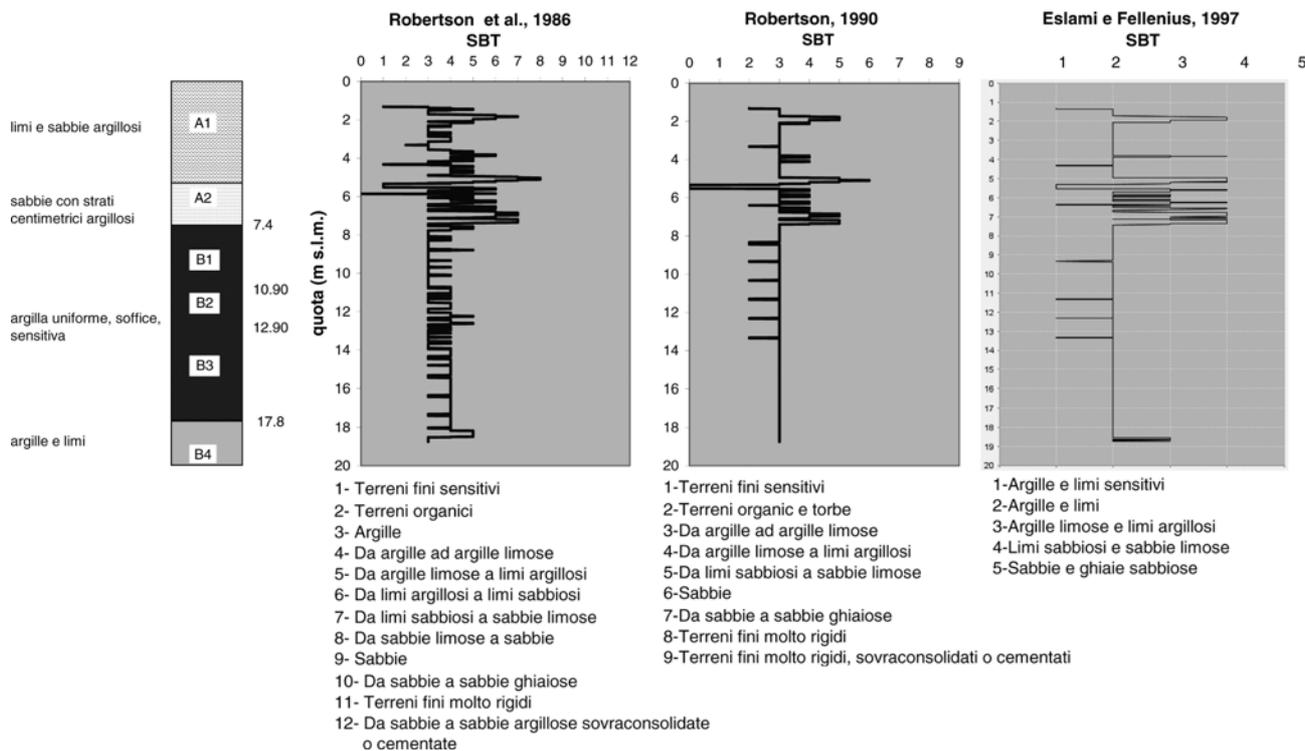


Fig. 23 – Sito I: Correlazioni tra profilo stratigrafico da sondaggio e quello ottenuto dall'interpretazione di prove CPTu. SBT: classi di comportamento del terreno.

Fig. 23 – Site I: Comparison between stratigraphical profile of the borehole and those obtained through CPTu tests. SBT: soil behaviour type.

quello di Eslami e Fellenius sembra condurre alle più basse percentuali di successo.

Bibliografia

- AHMADI M.M., ROBERTSON P.K. (2005) - *Thin layer effects on the CPT qc measurement*. Can. Geotech. J., vol. XLII, pp. 1302-1317.
- BEGEMANN H.K.S. (1965) - *The Friction Jacket Cone as an Aid in Determining the Soil Profile*, Proc. 6th IC-SMFE, n. 1, pp.17-20.
- CANADIAN GEOTECHNICAL SOCIETY (1985) – *Canadian Foundation Engineering Manual*. Part 1 Fundamentals, Canadian Geotechnical Society, BiTech Publishers, Vancouver, BC, 456 p.
- CESTARI F. (1990) - *Prove geotecniche in sito*. Ed. Geograph s.n.c, Segrate.
- CHERUBINI C., VESSIA G. (2006) - *La valutazione dei parametri di progetto dei terreni sulla base dei risultati di prove in sito: un'applicazione alle prove penetrometriche statiche*. Giornale di Geologia Applicata, vol. IV, pp. 109-114.
- DOUGLAS J.B., OLSEN R.S. (1981) - *Soil Classification using Electric Cone Penetrometer*. Symposium on Cone Penetration Testing and Experience, Geotechnical Engineering Division, ASCE, St. Louis, pp. 209-227.
- ESLAMI A., FELLENIUS B.H. (1997) - *Pile Capacity by Direct CPT and CPTu Methods Applied to 102 Case Histories*. Can. Geotech. J., vol. XXXIV, pp. 886-904.
- FELLENIUS H.B., ESLAMI A. (2000) - *Soil Profile Interpreted from CPTu Data*. "Year 2000 Geotechnics", Geotechnical Engineering Conference, Asian Institute of Technology, Bangkok.
- KURUP U., GRIFFIN E.P. (2006) - *Prediction of soil composition from CPT data using general regression neural network*. Journal of Computing in Civil Engineering, vol. XX, pp. 281-289.
- JUNG B.C., GARDONI P., BISCONTIN G. (2008) – *Probabilistic soil identification based on cone penetration tests*. Géotechnique, vol. LVIII, pp. 591-603.
- LO PRESTI D., JAMIOLKOWSKY M., PEPE M. (2002) – *Geotechnical characterization of the subsoil of Pisa Tower*. International Workshop on Characterization and Engineering Properties of Natural Soils, vol. II, Singapore, pp. 909-946.
- PAGANI (2009) - <http://www.pagani-geotechnical.com>
- ROBERTSON P.K., CAMPANELLA R.G., GILLESPIE D., GRIEG J. (1986) - *Use of Piezometer Cone Data*. Proceedings of American Society of Civil Engineers, ASCE, "In Situ 86: Specialty Conference", edited

- by S. Clemence, Blacksburg, June 23-25, Geotechnical Special Publication GSP n. 6, pp. 1263-1280.
- ROBERTSON P.K. (1990) - *Soil Classification Using the Cone Penetration Test*. Can. Geotech. J., vol. XXVII, pp. 151-158.
- SCHMERTMANN J.H. (1978) - *Guidelines for Cone Penetration Test, Performance and Design*. Report No. FHWA-TS-78-209, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., pp. 145.
- SEARLE I.W. (1979) - *The interpretation of Begemann Friction Jacket Cone Results to Give Soil Types and Design Parameters*. Design Parameters in Geotechnical Engineering, BCS London, vol. II, pp. 265-270.
- SENNEST K., SANDVEN R., JAMBU N. (1989) - *Evaluation of Soil parameters from piezocon test*. In – *Situ Testing of Soil Properties for Transportation*, Transportation Research Record n. 1235, Washington D.C., pp. 24-37.
- Viggiani C., Pepe M. (2006) – *Il sottosuolo della Torre in La torre restituita*. Poligrafico dello Stato, Roma
- VIVATRAT V. (1979) - *Cone Penetration in clays*. Ph.D. Thesis MIT Cambridge, Mass. (USA).
- VREUGDENHIL R., DAVIS R., BERRIL J. (1994) - *Interpretation of cone penetration results in multilayered soils*. International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics, vol. XVIII, pp. 585-599.
- ZHANG Z., TUMAY M.T. (1999) - *Statistical to fuzzy approach toward CPT soil classification*. J. Geotech. Geoenviron. Eng., vol. CXXV, pp. 179-186.

Use of cone penetration tests for soil profiling

Summary

Cone penetration tests are a well-established in situ test methods for site characterization. Their widespread use for subsurface explorations is due to their reliability, speed, economy and to the fact that they supply continuous records with depths of soil in situ engineering behaviour. One important use is the determination of the stratigraphic boundaries between soil layers and then the delineation of soil stratigraphy by comparing the sounding data with soil classification charts. The aim of the study is to verify the applicability of the most used empirical correlations for soil classification and soil stratigraphy description.

CPT, CPTu and boreholes data from some Italian sites, belonging to different geological contexts, were collected. Laboratory investigation helped in the geotechnical characterisation of the soils. In some cases penetration tests were repeated in different periods of the year (dry and wet period) and with the use of different fluids for the filter saturation. Borehole logs were compared with soil profiles obtained with cone penetration test. A percentage of success for each method was calculated.