

CONSIDERAZIONI SULLE PROCEDURE PER LA DETERMINAZIONE DEL LIMITE LIQUIDO: UN'APPLICAZIONE AI TERRENI ARGILLOSI UMBRI DEL PLIO-PLleistOCENE

SOME OBSERVATIONS ON THE PROCEDURES FOR THE DETERMINATION OF THE LIQUID LIMIT: AN APPLICATION ON PLIO-PLleistOCENIC CLAYEY SOILS FROM UMBRIA REGION (ITALY)

WALTER DRAGONI(*), NICOLETTA PROSPERINI(*) & GIUSEPPE VINTI(*)

(*) Dipartimento di Scienze della Terra - Università degli Studi di Perugia - Piazza Università, 1 - 06100 Perugia (Italy) - e_mail: nicoletta.prosperini@unipg.it

RIASSUNTO

I più diffusi metodi di determinazione del limite liquido sono quello del cucchiaino di Casagrande e del penetrometro a cono: altri metodi sono caduti in disuso o sono ancora in fase di sperimentazione. Il limite liquido ottenuto mediante il tradizionale cucchiaino di Casagrande soffre di una forte dipendenza dalla manualità e dall'esperienza dell'operatore, mentre quello che si ottiene con il penetrometro a cono è in pratica indipendente dall'operatore; rispetto al metodo del cucchiaino di Casagrande, tale vantaggio si ottiene senza alcuna complicazione aggiuntiva, dato che il penetrometro a cono è un'apparecchiatura semplice e d'utilizzo facile, veloce ed economico. Scopo di questa nota è contribuire alle conoscenze riguardanti le differenze fra i valori del limite liquido ottenuti con le due procedure: studi di questo tipo in Italia sono molto rari. Il lavoro eseguito, oltre a dimostrare l'ottima riproducibilità della procedura con il cono, indica che la differenza tra le due procedure (in media intorno al 2.5%) aumenta all'aumentare del valore del limite liquido. In tale contesto viene fornita una relazione che correla molto bene i valori ottenuti dalle due procedure per terreni argillosi dell'Italia Centrale. I risultati indicano inoltre, in alcuni casi, una variazione non trascurabile nella posizione dei campioni sulla Carta di Casagrande secondo il metodo usato per la determinazione del limite liquido; viene suggerito che tale problema non è forse del tutto trascurabile e che forse merita qualche approfondimento.

TERMINI CHIAVE: limite liquido, cucchiaino di Casagrande, penetrometro a cono

SIMBOLI E ACRONIMI USATI NEL TESTO

LL = Limite Liquido
LLcon = LL ottenuto dal penetrometro a cono
LLcup = LL ottenuto dal cucchiaino di Casagrande
USCS = Unified Soil Classification System
AASHTO = American Association of State Highway Transportation Officials
ASTM = American Society for Testing Materials International
BS = British Standards Institution
UNI CEN-ISO/TS = Italian Organization for Standardization - European Committee for Standardization - International Organization for Standardization - Technical Standard
SD: Standard deviation

ABSTRACT

The procedures most commonly used in the geotechnical practice to determine the LL are the Casagrande device and the cone penetrometer, other techniques being no longer in use or still being tested. The liquid limit value obtained by the application of the Casagrande device, compared to the cone penetrometer method, is strongly dependent on the experience, practice and manual skills of the operator, whereas the cone procedure is more rational and independent from the operator, and it is as simple and economic as Casagrande's cup method. This note is to contribute to the studies regarding the comparison between the two methods and gives a relationship, statistically significant, between liquid limits determined by the two procedures for a set of natural soils of Central Italy. Results indicate that the difference between the two procedures increases with the increasing of the liquid limit. Moreover, the results show, in some cases, a not negligible variation of the position of the tested soils into the Casagrande Chart, depending on the procedure used for the determination of the liquid limit; it is suggested that perhaps this problem is worth further analysis.

KEY WORDS: liquid limit, Casagrande's cup, cone penetrometer

SYMBOLS AND ACRONYMES

LL = Liquid Limit
LLcone = LL obtained from cone penetrometer
LLcup = LL obtained from Casagrande's
USCS = Unified Soil Classification System
AASHTO = American Association of State Highway Transportation Officials
ASTM = American Society for Testing Materials International
BS = British Standards Institution
UNI CEN-ISO/TS = Italian Organization for Standardization - European Committee for Standardization - International Organization for Standardization - Technical Standard
SD: Standard deviation

AE: Average error
CV: Coefficient of variation

INTRODUZIONE

I limiti di consistenza o di Atterberg (ATTERBERG, 1911), trovano un vasto impiego nel campo della geotecnica e della geologia applicata. Il loro utilizzo è dovuto essenzialmente a tre motivi: sono di facile determinazione, permettono di applicare le più comuni classificazioni internazionali dei terreni (USCS - Carta di Casagrande, AASHTO), sono correlabili con importanti parametri idraulici e meccanici, quali permeabilità, compressibilità e resistenza al taglio (SKEMPTON, 1944, 1957; BJERRUM & SIMONS, 1960; SEED *et alii*, 1964; KARLSSON & VIBERG, 1967; TERZAGHI & PECK, 1967; WROTH & WOOD, 1978; NAGARAJ *et alii*, 1991; SRIDHARAN & NAGARAJ, 2000; SRIDHARAN & PRAKASH, 2000; CHERUBINI *et alii*, 2001; WESLEY, 2003).

I limiti di Atterberg possono essere determinati in vario modo, e numerosi lavori hanno messo a confronto le procedure disponibili per la loro determinazione (ZABARA, 1968; LITTLETON & FARMILLO, 1977; WOOD, 1982; BUDHU, 1985; BELVISO *et alii*, 1985; WASTI & BEZIRCI, 1986; WASTI, 1987; CHRISTARAS, 1991; LEROUÉIL & LE BIHAN, 1996; SRIDHARAN & PRAKASH, 1998; WHYTE, 1982, 1983; SHERWOOD & RYLEY, 1970; MOON & WHITE, 1985; MENDOZA & OROZCO, 2001; PRAKASH & SRIDHARAN, 2002; LANDRIS & FREEMAN, 2007).

I metodi di determinazione del limite liquido oggi più diffusi sono quelli del cucchiaio di Casagrande (CASAGRANDE, 1932, 1958) e del penetrometro a cono (TERZAGHI, 1927, HANSBO, 1957; HOULSBY, 1982; KOUMOTO & HOULSBY, 2001); altri metodi sono caduti in disuso o sono ancora in fase di sperimentazione. Le procedure standardizzate che descrivono l'uso di tali apparecchiature sono, per il cucchiaio di Casagrande, AASHTO T89, ASTM D 4318-00, CEN-ISO/TS-17892/12 (che ha sostituito UNI 10014), BS 1377 e NF P94-051; le differenze sostanziali tra queste riguardano le dimensioni dello strumento solcatore, il tipo di coppa e il materiale che costituisce la base di battuta della coppa stessa. Le procedure standardizzate che descrivono l'uso del penetrometro a cono sono essenzialmente BS 1377, SS 027120-1990, CAN/BNQ 2501-032, NF P94-052 e CEN ISO/TS-17892/12 (adottata UNI CEN 17892/12-04), vengono utilizzati penetrometri a cono (modelli inglese, russo, indiano e georgiano), che differiscono per le dimensioni e il peso della punta conica e per la profondità di penetrazione alla quale riferire il contenuto d'acqua che rappresenta il limite liquido.

Con il metodo del cucchiaio di Casagrande si determina il contenuto d'acqua (limite liquido), corrispondente ad una chiusura di una porzione pari a 13 mm del solco tracciato in un campione rimaneggiato di terreno posto all'interno del cucchiaio, dopo 25 colpi di percussione dello stesso sulla base d'appoggio, con altezza di caduta costante. Con il metodo del penetrometro a cono si determina il contenuto d'acqua (limite liquido) corrispondente alla penetrazione di 20 mm, all'interno di un campione rimaneggiato di terreno, della punta conica del penetrometro.

In pratica, con l'uso del penetrometro a cono il concetto di limite liquido passa da quello di determinazione del contenuto d'acqua al quale corrisponde un comportamento fluido (vale a dire il contenuto

AE: Average error
CV: Coefficient of variation

INTRODUCTION

Atterberg consistency limits (ATTERBERG, 1911) are widely used in the fields of geotechnics and geoenvironmental engineering. This extensive use is due to their simple performing, their use for the international soil classification systems (USCS, AASHTO), and for many correlations with several mechanical and hydraulic properties, such as permeability, compressibility and shear strength (SKEMPTON, 1944, 1957; BJERRUM & SIMONS, 1960; SEED *et alii*, 1964; KARLSSON & VIBERG, 1967; TERZAGHI & PECK, 1967; WROTH & WOOD, 1978; NAGARAJ *et alii*, 1991; SRIDHARAN & NAGARAJ, 2000; SRIDHARAN & PRAKASH, 2000; CHERUBINI *et alii*, 2001; WESLEY, 2003).

Atterberg limits can be determined by different procedures, and many studies have made comparative surveys (ZABARA, 1968; LITTLETON & FARMILLO, 1977; WOOD, 1982; BUDHU, 1985; BELVISO *et alii*, 1985; WASTI & BEZIRCI, 1986; WASTI, 1987; CHRISTARAS, 1991; LEROUÉIL & LE BIHAN, 1996; SRIDHARAN & PRAKASH, 1998; WHYTE, 1982, 1983; SHERWOOD & RYLEY, 1970; MOON & WHITE, 1985; MENDOZA & OROZCO, 2001; PRAKASH & SRIDHARAN, 2002; LANDRIS & FREEMAN, 2007).

Nowadays the two procedures most commonly used in the geotechnical practice for the determination of the liquid limit (LL) are the Casagrande device (CASAGRANDE, 1932, 1958) and the cone penetrometer (TERZAGHI, 1927, HANSBO, 1957; HOULSBY, 1982; KOUMOTO & HOULSBY, 2001); other techniques are no longer in use or still being tested. The standard methods for the Casagrande device are outlined in AASHTO-T89, ASTM-D4318-00, UNI-10014 (superseded from January, 1st 2008), BS-1377 and NF-P94-051; these procedures basically differ in the dimensions of the grooving tool, the type of the cup and of the base. The standard methods for the cone penetrometer are BS-1377, SS 027120-1990, CAN/BNQ-2501-032, NF-P94-052 and CEN-ISO/TS-17892/12 (from January, 1st 2008 UNI-CEN-17892/12); cone penetrometers used are of British, Russian, Indian and Georgian types; they differ in the dimension and the weight of the cone, and in the depth of penetration referred to the water content at the liquid limit. In this work LL values are obtained from the British type of cone penetrometer.

According to Casagrande method the liquid limit is defined as the water content corresponding to a fixed number of blows of cup device to close a groove cut through of the sample located in the cup. According to the cone penetrometer procedure, the liquid limit is defined as the water content taken at a fixed penetration depth of the cone in the sample, located in a pot; therefore, the experimental concept of liquid limit changes from the determination of the water content at which the soil becomes a fluid (i.e. the water content at which the soil flows as a liquid), to that of the water content corresponding to a undrained shear strength of 1.7-2.3 kPa (NORMAN, 1958; YOUSSEF *et alii*, 1965; WROTH & WOOD, 1978, and references therein).

It is well known that the value of liquid limit obtained according

d'acqua per il quale il terreno diventa sufficientemente liquido, nelle condizioni e convenzioni imposte dalla procedura, tanto da scorrere come un fluido), a quello di determinazione del contenuto d'acqua corrispondente ad una resistenza al taglio non drenata variabile tra 1.7 e 2.3 kPa (si veda ad esempio NORMAN, 1958; YOUSSEF *et alii*, 1965; WROTH & WOOD, 1978).

E' noto che il valore del limite liquido ottenuto mediante il cucchiaino di Casagrande soffre di una forte dipendenza dalla manualità, dalla sensibilità e dall'esperienza dell'operatore. E' quindi una prova condizionata da un certo grado di soggettività, che si riflette in una ripetitività non sempre soddisfacente. Dalla letteratura risulta invece che la procedura del penetrometro a cono è molto meno dipendente dalla manualità e dall'esperienza dell'operatore, ed è quindi più rigorosa; inoltre mantiene le caratteristiche di semplicità e d'economia di tempi e materiali utilizzati con il metodo di Casagrande.

Per quanto riguarda la situazione in Italia, per la pratica geotecnica viene ancora normalmente utilizzato il metodo del cucchiaino di Casagrande (con procedure ASTM e UNI). Tale consuetudine però è destinata ad esaurirsi: la nuova normativa sulle procedure da seguire per le prove di laboratorio, entrata in vigore da gennaio 2008 (UNI CEN ISO/TS 17892/12), recependo il carattere di maggiore rigore scientifico che viene richiesto per le prove geotecniche di routine, prescrive l'utilizzo del penetrometro a cono.

In Italia studi sperimentali di confronto sulle procedure di determinazione dei limiti di consistenza, ad eccezione di BELVISO *et alii* (1985) sembrano essere assenti. In quest'ottica, scopo principale del presente lavoro è fornire un contributo alle conoscenze sulle differenze e le correlazioni tra i risultati ottenuti tramite le due procedure di determinazione del limite liquido. I risultati ottenuti indicano, in alcuni casi, una variazione nella posizione dei campioni sulla Carta di Casagrande secondo il metodo usato per la determinazione del limite liquido; tale problema forse merita ulteriori approfondimenti. Da un punto di vista pratico, si ritiene che i dati ed i risultati ottenuti, qualora fosse necessario considerare assieme determinazioni eseguite con i due diversi metodi, possono essere di qualche utilità per i laboratori in fase di attuazione della nuova normativa, la quale, recependo la direttiva europea, prevede l'uso del penetrometro a cono in sostituzione del cucchiaino di Casagrande.

ANALISI EFFETTUATE SUI CAMPIONI

Sono stati scelti per questo studio 30 campioni di terreni argillosi provenienti dai sedimenti Plio - Pleistocenici umbri, in facies marina e continentale (Fig. 1). Di ogni campione sono stati determinati la distribuzione granulometrica (ASTM D421-85; D422-63), la gravità specifica (CEN ISO/TS 17892/3), e i limiti liquido (con cucchiaino a base morbida - BS 1377-90) e plastico (BS 1377-90); i terreni sono stati classificati secondo i sistemi USCS - Carta di Casagrande (2000) e AASHTO (2004) mediante il programma MAXLAB2 (DRAGONI *et alii*, 2005 - Tab. 1). Per ogni campione è stato quindi determinato il limite liquido utilizzando l'apparecchiatura del pene-

to Casagrande's cup method is strongly dependent on manual skill, sensitivity and experience of the operator, therefore the degree of repeatability is quite poor. The cone penetrometer method requires a minimal action of the operator and less sensitivity, consequently it is more rigorous; yet, it retains the simplicity and the economy of the cup procedure.

As for Italian laboratory practice concern, the most widely used method for the determination of the liquid limit is the Casagrande device, according to ASTM and UNI/ISO standards; the latter would be superseded, since the new standard UNI-CEN-ISO/TS-17892/12-2005 came into force from January 2008 onwards. This new standard, according to the general need of more reasonable accuracy for geotechnical tests, establishes the use of the cone penetrometer for the determination of the liquid limit.

The aim of this work is to contribute to the discussion about the differences and the relationships between the two conventional methods used to determine LL; it seems there are not Italian studies (except for BELVISO *et alii*, 1985). Finally, data and correlation resulting from this study can be used as a preliminary reference for the laboratories implementation of the UNI-CEN/ISO cone test method.

SAMPLING AND ANALYTICAL METHODS

Thirty natural clayey soils from Pio-Pleistocenice clayey facies of Central Italy were used in this investigation (Fig. 1). For each sample the grain size distribution (ASTM D421-85; D422-63), the specific gravity (CEN ISO/TS 17892/3), the plastic limit (BS 1377-90), and LL by means of the Casagrande device with oft base (BS 1377-90) were determined; soils were classified by means classification systems USCS - Casagrande Chart (2000) and AASHTO (2004) with the computing of MAXLAB2 code (DRAGONI *et alii*, 2005 - Tab. 1). For each sample the liquid limit was determined using the cone penetrometer (BS 1377-90); liquid limits were also determined accord-

CONSIDERAZIONI SULLE PROCEDURE PER LA DETERMINAZIONE DEL LIMITE LIQUIDO:
UN'APPLICAZIONE AI TERRENI ARGILLOSI UMBRI DEL PLIO-PLleistOCENE

trometro a cono secondo la procedura BS 1377-90. Su 15 campioni selezionati è stato anche determinato il limite liquido tramite il cucchiaio di Casagrande con base dura (procedura ASTM D 4318-00), allo scopo di confrontare i valori ottenuti con cucchiai dotati di diverso tipo di base con quelli ottenuti con il penetrometro a cono, e di valutare inoltre le possibili variazioni nella classificazione dei terreni ricavata mediante la Carta di Casagrande dei dati relativi ai tre tipi di determinazione. Sono state eseguite ripetizioni di prova per ogni campione, e analisi statistiche dei risultati sia sul singolo campione sia su ogni gruppo di valori del limite liquido, nel rispetto delle procedure ASTM D 4318-00 (paragrafo 17, Tab. 2), ASTM D 6026, ASTM E 177, ASTM WK 3539 e ASTM D 4356-84 (2002). Ogni singola determinazione, eseguita su correlazioni di 5 punti rispettivamente nell'intervallo 15-35 mm di penetrazione per il penetrometro a cono, e nell'intervallo 15-35 colpi del cucchiaio di Casagrande, ha restituito il valore LL con coefficiente di regressione $R \geq 0.98$.

ing to the ASTM D 4318-00 standard (cup with hard base) for fifteen selected samples, with the aim to obtain a comparison between data from different hardness of the cup bases and from the cone, and also to evaluate the possible variation on the classification of the soil investigated within the Casagrande Chart.

Replicated tests were performed, together with statistical analyses both on a single sample and on LL values obtained from a single procedures, according to ASTM D 4318-00 (section 17, Tab. 2), ASTM D 6026, ASTM E 177, ASTM WK 3539 and ASTM D 4356-84 (2002). All the test results were processed using 5 determinations performed within the range 15-35 mm of penetration depth of the cone, and the range of 15-35 blows of the Casagrande's cup respectively, and in all the cases the tests have given LL values with a regression coefficient $R \geq 0.98$.

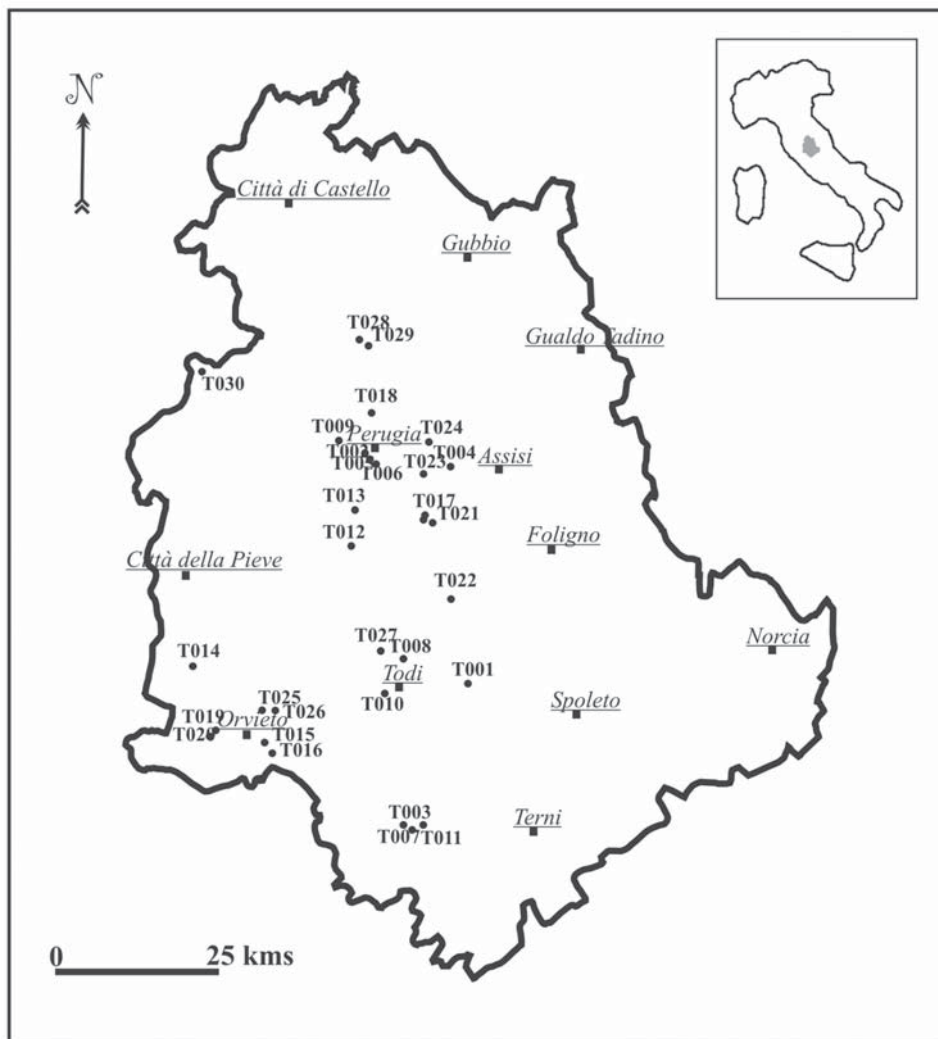


Fig. 1 - Mappa schematica della Regione Umbria con ubicazione dei campioni analizzati
- Schematic map of Umbria Region in which location of studied soil samples is reported

INTERACTIONS BETWEEN GROUNDWATER AND RIVER MARTA (CENTRAL ITALY) AND PROBLEMS RELATED TO THE DEFINITION OF THE INSTREAM FLOW

Campione Sample	γ_s	Distribuzione granulometrica (%) Grain size distribution (%)				PL %	LL% (BS - cup)	Classificazione Classification USCS	Classificazione Classification AASHTO
	g/cm ³	Ghiaia Gravel	Sabbia Sand	Limo Silt	Argilla Clay				
1	2.70	0.0	0.1	61.0	38.9	21.8	53.5	CH	A7-6
2	2.69	0.5	52.3	24.5	22.7	13.3	35.9	CL	A6
3	2.65	7.9	15.5	32.2	44.4	17.7	58.0	CH	A7-6
4	2.71	1.8	5.5	50.0	42.7	23.1	55.1	CH	A7-6
5	2.72	4.0	21.9	44.9	29.2	16.3	37.1	CL	A6
6	2.70	10.5	3.5	42.3	23.7	15.9	40.9	CL	A7-6
7	2.75	0.0	10.5	57.7	31.8	20.9	57.5	CH	A7-6
8	2.75	0.0	0.5	60.6	38.9	22.0	49.3	CL	A7-6
9	2.74	0.5	21.9	56.8	20.8	18.2	34.4	CL	A6
10	2.70	0.5	31.3	42.9	25.3	19.7	43.3	CL	A7-6
11	2.66	0.0	10.8	37.4	51.8	23.7	63.1	CH	A7-6
12	2.82	0.0	2.4	33.6	64.0	28.8	83.9	CH	A7-6
13	2.74	0.8	13.9	40.3	45.0	23.5	61.8	CH	A7-6
14	2.70	0.0	0.4	46.6	53.0	23.2	60.8	CH	A7-6
15	2.73	0.0	4.0	64.9	31.1	20.3	41.6	CL	A7-6
16	2.71	0.0	6.0	59.3	34.7	20.0	45.3	CL	A7-6
17	2.71	0.0	0.0	60.5	39.5	20.9	46.5	CL	A7-6
18	2.69	13.4	23.5	33.2	29.9	17.9	40.8	CL	A7-6
19	2.73	0.0	1.5	51.9	46.6	25.8	64.1	CH	A7-6
20	2.71	0.0	2.4	44.8	52.8	21.7	48.7	CL	A7-6
21	2.68	0.0	1.8	30.6	67.6	25.1	73.3	CH	A7-6
22	2.73	0.0	4.0	76.1	19.9	20.7	40.0	CL	A6
23	2.66	1.1	4.9	54.8	39.2	18.7	56.0	CH	A7-6
24	2.67	0.5	1.6	43.5	54.4	22.7	68.5	CH	A7-6
25	2.68	0.0	1.4	61.6	37.0	21.9	46.5	CL	A7-6
26	2.69	0.0	0.1	63.6	36.3	22.1	41.1	CL	A7-6
27	2.67	10.5	19.4	43.5	26.6	22.4	44.9	CL	A7-6
28	2.73	0.0	11.1	61.3	27.6	21.0	50.4	CH	A7-6
29	2.71	0.0	6.6	54.2	39.2	21.2	54.4	CH	A7-6
30	2.65	0.0	44.0	43.2	12.8	15.8	31.1	CL	A6

Tab. 1 - Caratteristiche generali e classificazione dei terreni analizzati
- Properties and classifications of tested soils

RISULTATI E DISCUSSIONE

Nella tabella 2 sono riportati i valori dei limiti di consistenza determinati utilizzando il metodo di Casagrande e la procedura con il penetrometro a cono.

Per quanto riguarda il confronto tra valori ottenuti con il penetrometro a cono e quelli forniti dal cucchiaio di Casagrande con base morbida, in generale si può osservare che, mediamente, all'aumentare del limite liquido i valori di questo ottenuti con il penetrometro a cono si discostano maggiormente da quelli ottenuti con il cucchiaio; quest'ultimo metodo fornisce valori maggiori per tutti i campioni analizzati (Fig. 2), tranne che per due valori.

La figura 3 rappresenta la relazione tra i valori del limite liquido ottenuti con le due procedure; l'equazione che esprime la migliore

RESULTS AND DISCUSSION

Table 2 shows the consistency limits determined using the Casagrande method (BS-soft base) and the cone penetrometer test. As far as the comparison between LL data from cone penetrometer and Casagrande's cup with soft base concern, for almost all samples (with the exception of two) higher limits are founded for the cup method; it can be also observed that as the LL value increases, data obtained by using the cone penetrometer method drift more away from those determined by using the Casagrande's cup (Fig. 2).

LL values determined from the two procedures are compared in Figure 3; the equation of best fitting obtained by linear regression

**CONSIDERAZIONI SULLE PROCEDURE PER LA DETERMINAZIONE DEL LIMITE LIQUIDO:
UN'APPLICAZIONE AI TERRENI ARGILLOSI UMBRI DEL PLIO-PLEISTOCENE**

Campione Sample	Limite Liquido (%) Liquid limit (%)			Limite plastico Plastic limit (%) BS	Indice Plastico (%) Plastic Index - PI (%)		
	BS cucchiaino di Casagrande base morbida Casagrande cup soft base	ASTM cucchiaino di Casagrande base dura Casagrande cup hard base	BS penetrometro a cono cone penetrometer		BS cucchiaino di Casagrande base morbida Casagrande cup soft base	ASTM cucchiaino di Casagrande base dura Casagrande cup hard base	BS penetrometro a cono cone penetrometer
T030	31.08	27.58	30.29	15.75	15.33	11.83	14.54
T009	34.43	32.46	33.70	18.18	16.25	14.28	15.52
T002	35.86		34.03	13.30	22.56		20.73
T005	37.05		36.84	16.34	20.71		20.50
T022	39.98	36.46	38.37	20.70	19.28	15.76	17.67
T018	40.82	31.60	38.36	17.88	22.94	13.72	20.48
T006	40.85		37.53	15.94	24.91		21.59
T026	41.11		45.00	22.07	19.04		22.93
T015	41.62		42.45	20.29	21.33		22.16
T010	43.28	38.51	41.78	19.71	23.57	18.80	22.07
T027	44.85		44.45	22.40	22.45		22.05
T016	45.32	41.61	43.30	20.01	25.31	21.60	23.29
T017	46.51		44.70	20.85	25.66		23.85
T025	46.51		40.16	21.88	24.63		18.28
T020	48.70		47.32	21.74	26.96		25.58
T008	49.30	43.08	46.24	21.95	27.35	21.13	24.29
T028	50.40		47.39	21.03	29.37		26.36
T001	53.51		52.69	21.80	31.71		30.89
T029	54.40	49.21	51.39	21.20	33.20	28.01	30.19
T004	55.10		50.71	23.09	32.01		27.62
T023	55.96	48.07	51.57	18.70	37.26	29.37	32.87
T007	57.54		53.09	20.87	36.67		32.22
T003	58.02	54.42	53.66	17.72	40.30	36.70	35.94
T014	60.81	52.58	55.72	23.21	37.60	34.86	32.51
T013	61.76		57.65	23.53	38.23		34.12
T011	63.13		59.55	23.74	39.39		35.81
T019	64.05	58.53	61.55	25.83	38.22	32.70	35.72
T024	68.45	61.17	62.58	22.70	45.75	38.47	39.88
T021	73.31	62.70	66.14	25.14	48.17	37.56	41.00
T012	83.85	74.17	76.73	28.79	55.06	45.38	47.94

Tab. 2 - Limiti di consistenza dei terreni analizzati
- Consistency limits of tested soils

correlazione ottenuta per regressione lineare mediante il metodo dei minimi quadrati, è data da:

$$LL_{cono} = 0.857 LL_{cucchiaio} + 4.55 \quad (1)$$

La sintesi dei risultati dell'analisi statistica relativa è restituita in legenda.

Osservando invece i valori ottenuti con il cucchiaino di Casagrande con base dura, in generale si può osservare che, mediamente, ad un aumento del valore del limite liquido i valori ottenuti con il metodo del penetrometro a cono mantengono uno scostamento circa costante da quelli del cucchiaino, pari a circa 1-3 unità percentuali, ed un valore superiore per tutti i campioni analizzati, tranne che in una determinazione (Fig. 4).

analysis using the least squares method is given by:

$$LL_{cono} = 0.857 LL_{cup} + 4.55 \quad (1)$$

The summary of statistical analysis is reported in the graph label.

Data sets from cone penetrometer and Casagrande's cup with hard base show a uniform difference from 1 to 3 percentage points; higher limits are founded for the cone method for all samples but one (Fig. 4).

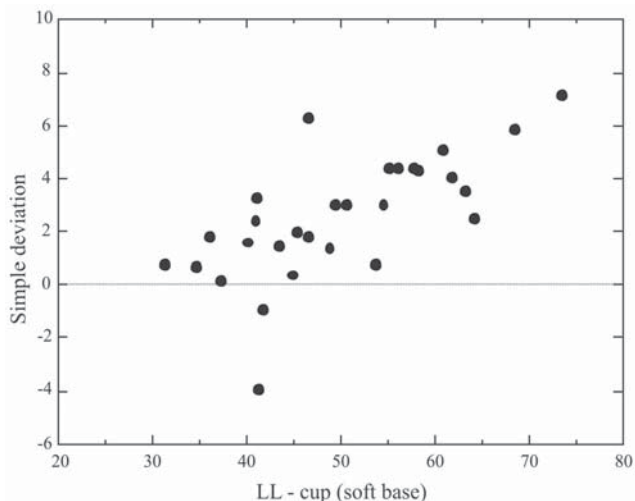


Fig. 2 - Relazione tra lo scostamento semplice dei due set di valori e i valori del limite liquido ottenuti con il metodo del cucchiaino di Casagrande a base morbida
- Relationship between liquid limit obtained by the Casagrande method (soft base) versus simple deviation from cone method

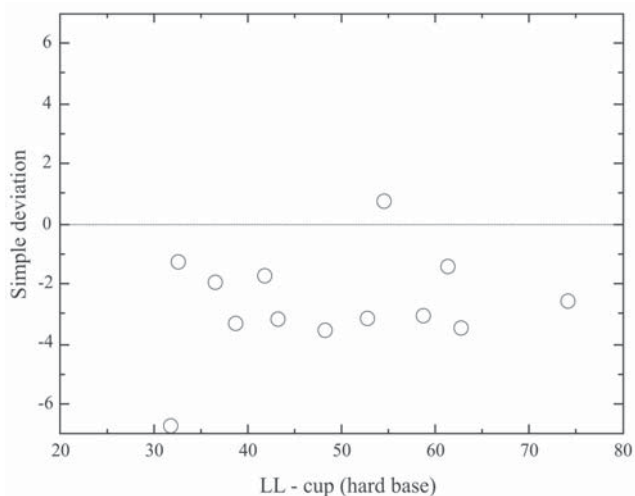


Fig. 4 - Relazione tra lo scostamento semplice dei due set di valori e i valori del limite liquido ottenuti con il metodo del cucchiaino di Casagrande a base dura
- Relationship between liquid limit obtained by the Casagrande method (hard base) versus simple deviation from cone method

La figura 5 mostra la relazione tra i valori del limite liquido ottenuti con le due procedure; l'equazione di migliore correlazione ottenuta per regressione lineare mediante il metodo dei minimi quadrati, è data da:

$$LL_{cono} = 0.974 LL_{cucchiaio} + 3.85 \quad (2)$$

La sintesi dei risultati dell'analisi statistica relativa è restituita in legenda.

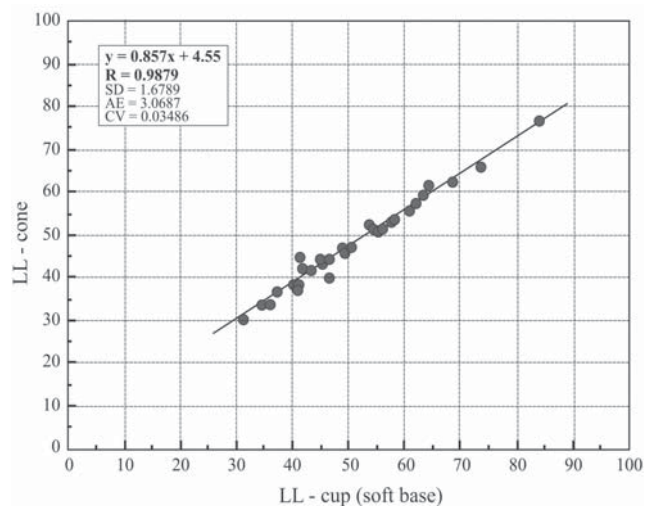


Fig. 3 - Relazione tra i valori del limite liquido ottenuti con la procedura del penetrometro a cono e con il metodo di Casagrande (base morbida). SD: deviazione standard; AE: errore medio; CV: coefficiente di variazione
- Relationship between liquid limit obtained by the cone method versus liquid limit obtained by the Casagrande method (soft base). SD: standard deviation; AE: average error; CV: coefficient of variation

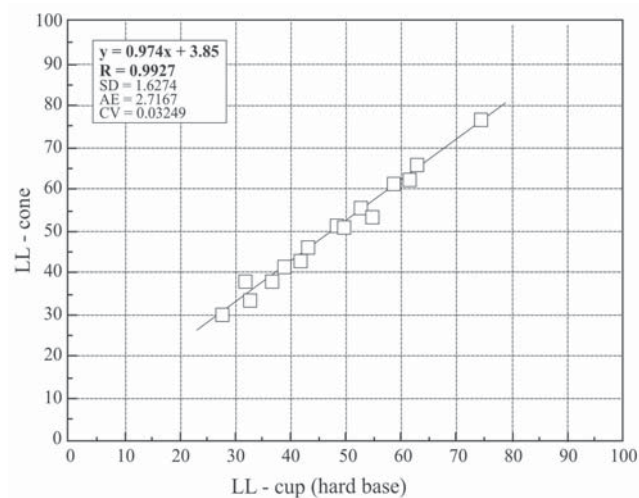


Fig. 5 - Relazione tra i valori del limite liquido ottenuti con la procedura del penetrometro a cono e con il metodo di Casagrande (base dura). SD: deviazione standard; AE: errore medio; CV: coefficiente di variazione
- Relationship between liquid limit obtained by the cone method versus liquid limit obtained by the Casagrande method (hard base). SD: standard deviation; AE: average error; CV: coefficient of variation

LL values determined from the two procedures are compared in Figure 5; the equation of best fitting obtained by linear regression analysis using the least squares method is given by:

$$LL_{cono} = 0.974 LL_{cup} + 3.85 \quad (2)$$

The summary of statistical analysis is reported in the graph label.

Autori / Reference	Modello di cono Type of cone	Base del cucchiaino Type of base	Relazione / Relationship
SHERWOOD & RYLEY (1970)	inglese ^o english ^o	morbida soft	$LL_{cone} = 0.909 LL_{cup} + 2.73^*$
LITTLETON & FARMILO (1977)	inglese ^o english ^o	morbida soft	$LL_{cone} = 0.97 LL_{cup} + 1.6$
BUDHU (1985)	inglese ^o english ^o	morbida soft	$LL_{cone} = 0.935 LL_{cup} + 4.02$
BELVISO <i>et alii</i> (1985)	inglese ^o english ^o	dura hard	$LL_{cone} = 0.999 LL_{cup} + 4.29^*$
SAMPSON & NETTERBERG (1985)	inglese ^o english ^o	dura hard	$LL_{cone} = 1.01 LL_{cup} + 4.2$
WASTI (1987)	inglese ^o english ^o	dura hard	$LL_{cone} = 1.0056 LL_{cup} + 4.92$

Tab. 3 - Relazioni tra i valori del limite liquido ottenuti con il metodo del penetrometro a cono (tipo inglese) e con la procedura di Casagrande, utilizzando in quest'ultima diversi tipi di base del cucchiaino (dura e morbida)
^o (BS-1377-90); *elaborazione da diagrammi o da dati pubblicati
 - Relationships between liquid determined by the cone penetrometer (English type) and the Casagrande method (hard and soft base)
^o (BS-1377-90); *elaboration from graph or published data

La tabella 3 contiene le diverse equazioni di correlazione, riportate da altri lavori per simili intervalli di valore del limite liquido. In tali studi manca l'analisi statistica relativa alla correlazione ottenuta (cfr. SHERWOOD & RYLEY, 1970; LITTLETON & FARMILO, 1977; BUDHU, 1985; BELVISO *et alii*, 1985; WASTI, 1987, SAMPSON & NETTERBERG, 1985), necessaria per un confronto più accurato; tuttavia dai grafici di correlazione in essi contenuti si può osservare una certa dispersione dei dati, piuttosto consistente quando il valore del limite liquido è maggiore del 50%. Le cause attribuite a tale dispersione non sono chiare, potendo dipendere da una variazione delle caratteristiche fisico-chimiche del terreno in laboratorio, e/o da problemi riguardanti la preparazione del campione e la determinazione vera e propria del limite liquido. E' possibile invece notare come i dati e le correlazioni ottenuti nel presente studio (Figg. 4 e 6) abbiamo una dispersione notevolmente minore, e che non c'è differenza di dispersione tra valori inferiori e superiori al 50% di limite liquido rispetto ai valori riportati in letteratura. Come già accennato, la correttezza nella preparazione del provino e nell'esecuzione delle determinazioni del limite liquido con i diversi metodi, è stata controllata mediante la rigida applicazione delle norme ASTM D3740-04, ASTM D 6026, ASTM E 177, ASTM WK 3539 e ASTM D 4356-84 (2002); l'affidabilità dei risultati ottenuti è dimostrata dal fatto che sia i dati della singola determinazione che quelli di ogni gruppo sono rientrati nei valori di riferimento indicati nel paragrafo 17, Tab. 2 della ASTM D 4318-00.

E' stata ricercata comunque una generalizzazione nella correlazione dei dati ottenuti con quelli di letteratura sia per valori ottenuti con cucchiaino a base morbida (Fig. 6), che per quelli con cucchiaino a base dura (Fig. 7), e per tutti i dati nel loro insieme (Fig. 8). Tenendo presente che i dati sono stati ottenuti da diversi ricercatori, e che quindi problemi inerenti alla riproducibilità possono

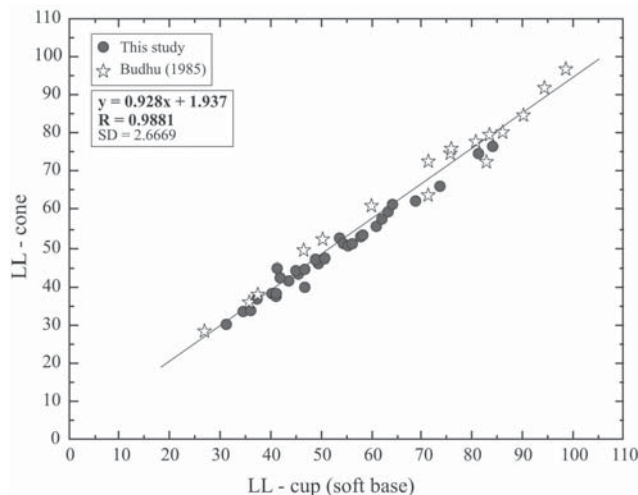


Fig. 6 - Relazione generale (con dati pubblicati) tra i valori del limite liquido ottenuti con la procedura del penetrometro a cono e con il metodo di Casagrande (base morbida)
 - General relationship (with published data sets) between liquid limit obtained by the cone method versus liquid limit obtained by the Casagrande method (soft base)

Table 3 contains various relationships from data of other researchers for the same range of LL values. Even if these studies do not report the statistical analysis of the obtained correlation (cf. SHERWOOD & RYLEY, 1970; LITTLETON & FARMILO, 1977; BUDHU, 1985; BELVISO *et alii*, 1985; WASTI, 1987, SAMPSON & NETTERBERG, 1985), some scattering can be observed from the published data set and graphs, in particular for LL values higher than 50%, probably due to the physical-chemical and mechanical characteristics of soils, the preparation of the specimen to the test, and also to the test performance: the discussion on this topic is still open. On the contrary, it can be noted that data obtained from the present investigation (Figs. 4, 6) are strongly clustered along the correlation lines; there is also no scattering of data point both for values of LL lower than 50% and higher than his threshold.

As mentioned above, for the reliability of test results, the correct preparation of test specimens and the proper conduction of the tests were performed by the strict enforcement of ASTM D 3740-04, ASTM D 6026, ASTM E 177, ASTM WK 3539 and ASTM D 4356-84 (2002); results from a single specimen and from values of a single test method fell extensively within the ranges of Tab. 2 ASTM D 4318-00.

Published correlations between LL from cone penetrometer and Casagrande's cup with soft base (Fig. 6), hard base (Fig. 7), and also for all available data on LL from cone penetrometer and Casagrande cup (Fig. 8), show that for LL values lower than 50% there are no considerable differences among the various correlations. However, the quality of the published correlations decrease for LL values higher than 50% (i.e. the scattering increases). Taking into account that published data were obtained from different laboratories and therefore the scattering could be due to a not so good reproducibility, at that our correlations are good in the entire range of the LL here con-

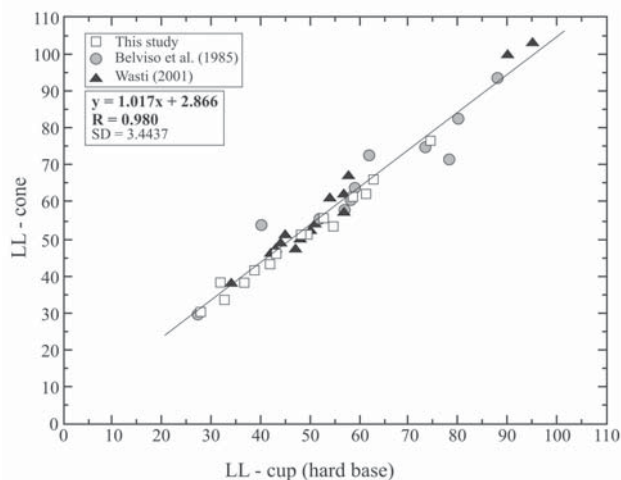


Fig. 7 - Relazione generale (con dati pubblicati) tra i valori del limite liquido ottenuti con la procedura del penetrometro a cono e con il metodo di Casagrande (base dura)
 - General relationship (with published data sets) between liquid limit obtained by the cone method versus liquid limit obtained by the Casagrande method (hard base)

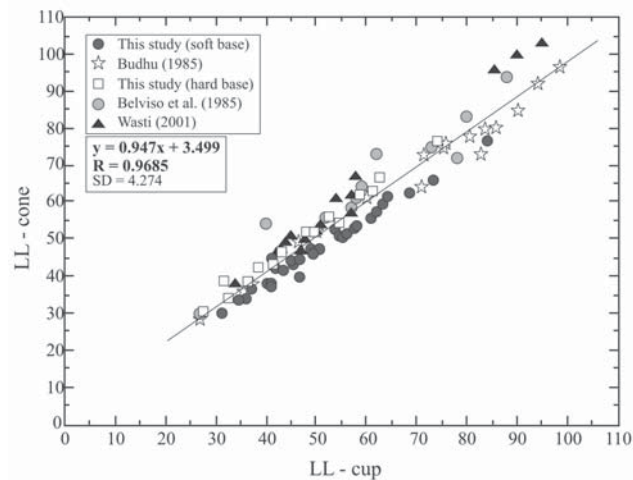


Fig. 8 - Relazione generale (con dati pubblicati) tra i valori del limite liquido ottenuti con la procedura del penetrometro a cono e con il metodo di Casagrande
 - General relationship (with published data sets) between liquid limit obtained by the cone method versus liquid limit obtained by the Casagrande method

influenzare la dispersione dei dati stessi, si può osservare come per valori del limite liquido inferiori a 50% non ci sono significative differenze tra le correlazioni generali e quelle specifiche, comprese quelle ottenute in questo studio; la dispersione dei dati per valori del LL superiori a 50% può indicare una maggiore affidabilità delle singole correlazioni (1) e (2) riportate nel presente lavoro.

Se si osserva infine la classificazione dei campioni analizzati secondo il sistema USCS - Carta di Casagrande, ottenuta inserendo tutti i valori del limite liquido ricavati con il penetrometro a cono e con il cucchiaino di Casagrande a base dura e a base morbida (Fig. 9a e 9b), tenendo presente che i valori del limite plastico sono quelli ottenuti applicando la procedura ASTM 4318, si può notare in generale che, passando da cucchiaino a base morbida a penetrometro a cono e cucchiaino a base dura, la posizione dei campioni tende a spostarsi in misura consistente dal campo ad alta plasticità a quello a bassa plasticità. In particolare per 2 campioni da penetrometro a cono e per 3 campioni da cucchiaino a base dura, i cui valori di LL sono tali da posizionarli nell'intorno delle rette del 50% e del 30% di LL, risulta modificata la classificazione (Tab. 4).

CONCLUSIONI

Dallo studio effettuato è possibile trarre le seguenti conclusioni:

1) La determinazione del limite liquido effettuata utilizzando il penetrometro a cono ed il cucchiaino di Casagrande indica che la differenza tra i valori ottenuti dalle due procedure aumenta all'aumentare del valore del limite liquido per dati da cucchiaino a base morbida,

Campione Sample	Classificazione Carta di Casagrande Classification on the Casagrande Chart		
	LL Cucchiaino di Casagrande base morbida Casagrande cup soft base	LL Cucchiaino di Casagrande base dura Casagrande cup hard base	LL penetrometro a cono cone penetrometer
T023	CH	CL	
T028	CH		CL
T029	CH	CL	
T030	CL (30%<LL<50%)	CL (LL<30%)	CL (LL<30%)

Tab. 4 - Variazione della classificazione basata sulla Carta di Casagrande dei terreni analizzati in funzione del tipo di apparecchiatura utilizzata per la determinazione del limite liquido
 - Variation in the Classification on the Casagrande Chart of tested soils in terms of testing device for the determination of LL

considered, it seems that the correlations (1) and (2) of this study can be confidently used for LL values higher than 50%.

The plotting of tested soils into the Casagrande Chart, obtained using LL values from the cone penetrometer and the Casagrande's device with soft and hard base (Figs. 9a, b), show a general shift of the soils position from high to low plasticity field, for LL values determined by using the cone penetrometer and the Casagrande's cup with hard base; in addition 2 soils with LL from cone and 3 soils with LL from cup with hard base changed their classification (Tab. 4).

CONCLUDING REMARKS

1) The comparison between LL values obtained using the cone penetrometer method and the Casagrande procedure show that LL values obtained by using the cone penetrometer method drift more away from those determined by using the Casagrande's cup with soft base as LL increases; on the contrary data sets from cone penetrom-

CONSIDERAZIONI SULLE PROCEDURE PER LA DETERMINAZIONE DEL LIMITE LIQUIDO:
UN'APPLICAZIONE AI TERRENI ARGILLOSI UMBRI DEL PLIO-PLleistOCENE

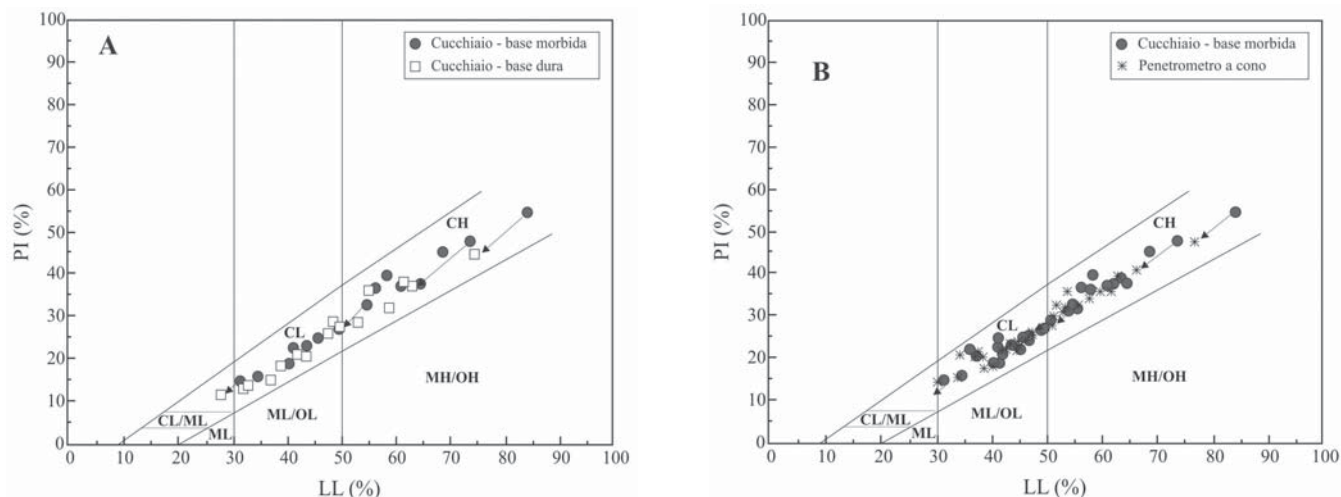


Fig. 9 - a) Classificazione USCS - Carta di Casagrande per i campioni analizzati con i metodi di determinazione del limite liquido del cucchiaino di Casagrande a base morbida e del penetrometro a cono; b) Classificazione USCS - Carta di Casagrande per i campioni analizzati con i metodi di determinazione del limite liquido del cucchiaino di Casagrande a base morbida e a base dura

- a) Casagrande Chart for tested soil samples with liquid limit determined according the methods of Casagrande's cup with soft and of the cone penetrometer; b) Casagrande Chart for tested soil samples with liquid limit determined according the methods of Casagrande's cup with soft and hard base

mentre si mantiene costante intorno alle 1-3 unità percentuali per quelli determinati con cucchiaino a base dura.

2) Sono state elaborate due buone correlazioni lineari fra le misure ottenute con le diverse procedure; tali correlazioni, più affidabili dal punto di vista statistico rispetto a simili relazioni proposte da altri autori, sono utilizzabili per ottenere valori del limite liquido da penetrometro a cono a partire da quelli ottenuti con il solo cucchiaino di Casagrande per terreni aventi limite liquido nell'intervallo 25% - 90%. Sono state anche ottenute correlazioni utilizzando i dati disponibili in letteratura, anch'esse affidabili per valori del limite liquido inferiori a 50%, indipendentemente dal tipo di base del cucchiaino di Casagrande.

3) A prescindere dalle correlazioni ottenute, per uno stesso terreno la scelta della procedura e della relativa apparecchiatura per la determinazione del limite liquido (penetrometro a cono o cucchiaino di Casagrande) sposta la posizione del campione sulla Carta di Casagrande; in particolare tutti i campioni posizionati nella Carta con LLcup a base morbida risultano più plastici rispetto al posizionamento con LLcup a base dura o LLcone; nel presente studio in alcuni casi risulta anche modificata la classificazione.

4) Le variazioni della posizione dei campioni sulla Carta di Casagrande, a seconda del metodo usato per la determinazione del LL, suscitano alcune perplessità sull'utilizzo dell'attuale struttura della Carta di Casagrande usando LLcone, dato che la Carta di Casagrande fu concepita ed usata per decenni in base a misure effettuate con il cucchiaino, spesso senza peraltro specificare il tipo di base; a questo proposito vale la pena di ricordare che sin dagli anni 1940 ci si era resi conto che il tipo di base del cucchiaino influenzava in maniera non trascurabile il risultato delle prove e che le differenze tra i valori di LL ottenuti mediante le due procedure aumentavano

eter and Casagrande's cup with hard base show a uniform difference from 1 to 3 percentage points.

2) Two good linear correlations result from the relationships between cone penetrometer and Casagrande device, both with soft and hard base: these correlations seem to be, from the statistical point of view, better than those proposed by other Authors, and can be used to obtain LLcone values from LLcup for soil with LL values ranging between 25% and 90%. In addition, more general relationships are obtained by adding the published data sets, which are reliable only for LL values up to 50%, irrespective to the hardness of the Casagrande's cup.

3) The sample position into the Casagrande Chart of USCS Soil Classification System varies considerably when the determination have been performed by use the cone penetrometer or the Casagrande device; in particular soils with LL from cup with soft base resulted much more plastic, and for 5 soils tested the USCS classification changed from CH to CL.

4) The variations of the position of the samples on the Casagrande chart, according to the method used to determine LL, create some perplexities regarding the usage of the current structure of Casagrande's chart with the LLcone. Indeed the chart of Casagrande was conceived and used for decades on the basis of cup measurements, often without specifying the base type; one ought to recall that as early as the 1940s it was realized that the type of cup base influenced the results in a non-negligible way, and that the differences between LLcone and LLcup increased as LL increased. (cf. LAMBE, 1951). A more through analysis of the issue is beyond the scope of this note, but the subject, apart from the methodological and classificatory aspects, could be non entirely negligible. Indeed, as it is well known, there are various empiric criteria, currently still wide-

INTERACTIONS BETWEEN GROUNDWATER AND RIVER MARTA (CENTRAL ITALY) AND PROBLEMS RELATED TO THE DEFINITION OF THE INSTREAM FLOW

all'aumentare di LL (cfr. per esempio LAMBE, 1951). L'approfondimento di tutto ciò esula dagli scopi della presente nota, ma l'argomento, al di là dei pur importanti aspetti metodologici e classificativi, potrebbe essere non del tutto trascurabile: come è noto, per esempio, esistono criteri empirici, ancora largamente in uso, che sulla base della posizione nella Carta di Casagrande, indicano in via speditiva alcune caratteristiche geotecniche delle terre e la loro propensione ad essere utilizzate per vari scopi come, per esempio, materiale da costruzione o terreno di fondazione (cfr. WAGNER, 1957; COLOMBO, 1974; LAMBE & WHITMAN, 1979; CASADIO & ELMI, 1995; BELL, 2000). In quest'ottica l'argomento meriterebbe forse qualche ulteriore indagine, finalizzata a verificare se non valga la pena, a seguito dell'introduzione e standardizzazione delle misure del LL con il cono, di riaggiustare la classificazione eseguita secondo la Carta di Casagrande, o di apportare alla stessa lievi modifiche, tenendo conto del metodo usato per la determinazione del LL.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano P. Bartoccini, P. Boila, S. Brunelli, E. Cherubini, P. Chiraz, R. Ficiarà e G. Marascia per il generoso aiuto nel reperimento di alcuni campioni.

OPERE CITATE / REFERENCES

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS (2004) - *M145-91: Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS (1996) - *T89-96: Determining the Liquid Limit of Soils*.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS INTERNATIONAL (1998) - *Designation D421-85: Practice for dry preparation of soil samples for particle-size analysis and determination of soil constant*. 04.08, 8-9.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS INTERNATIONAL (1998) - *Designation D422-63: Standard test method for particle-size analysis of soils*. 04.08, 10-17.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS INTERNATIONAL (2000) - *Designation D854-98: Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer*. 04.08, 93-99.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS INTERNATIONAL (2000) - *Designation D 2487: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)*. 04.08, 246-257.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS INTERNATIONAL (2000) - *Designation D 4318: Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*. 04.08, 561-572.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS INTERNATIONAL (2002) - *D 4356-84: Standard practice for establishing consistent test methods tolerance*. 14.02.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS INTERNATIONAL (2003) - *WK 3539: New practice for reporting uncertainty of test results and use of the term uncertainty in ASTM test methods*.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS INTERNATIONAL (2004) - *D 3740ae1: Standard practice for minimum requirements for agencies engaged in the testing and/or inspection of soil and rock as used in engineering design and construction*. 04.08.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS INTERNATIONAL (2006) - *D 6026: Standard practice for using significant digits in geotechnical data*. 04.09.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS INTERNATIONAL (2006) - *E 177-b: Standard practice for use of the terms precision and bias in ASTM test methods*.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALIZATION (1993) - *NF P94-051: Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau*.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALIZATION (1995) - *NF P94-052-1: Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Partie 1: limite de liquidité - Méthode du cône de pénétration*.
- ATTERBERG A. (1911) - *Lerornas förhållande till vatten, deras plasticitetsgränser och plasticitetsgrader*. K. Lantbr Akad. Handl. Tidskr., **50** (2): 132-158.
- BELL F. G. (2000) - *Engineering Properties of Soils and Rocks*. Blackwell Science, 4th Edition, 482 pp.
- BELVISO R., CIAMPOLI S., COTECCHIA V. & FEDERICO A. (1985) - *Use of the cone penetrometer to determine consistency limits*. Ground Engineering, **18**, 5: 21-22.
- BJERRUM L. & SIMONS N.E. (1960) - *Comparison of shear strength characteristics of normally consolidated clays*. ASCE Research Conference on the shear strength

ly in use, that indicates some geotechnical characteristics of soils and their possible uses according to the position on Casagrande's chart (cf. WAGNER, 1957; COLOMBO, 1974; LAMBE & WHITMAN, 1979; CASADIO & ELMI, 1995; BELL, 2000). From this point of view, perhaps the subject deserves further investigation, aimed to verify if wouldn't be worth re-adjusting the classification done with Casagrande's chart, or modifying it slightly, to account for the method used for determining LL.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors are grateful to P. Bartoccini, P. Boila, S. Brunelli, E. Cherubini, P. Chiraz, R. Ficiarà and G. Marascia for their help in retrieving some samples.

**CONSIDERAZIONI SULLE PROCEDURE PER LA DETERMINAZIONE DEL LIMITE LIQUIDO:
UN'APPLICAZIONE AI TERRENI ARGILLOSI UMBRI DEL PLIO-PLEISTOCENE**

- of cohesive soils, Boulder, CO, 711-726.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION (1990) - BS 1377: *British standard methods of test for soils for engineering purposes. Classification tests: determination of liquid limit, preferred method using the cone penetrometer. 2.*
- BROWN P.J. & DOWNING M.C. (2001) - *Replay to "T.W. Feng (2000): Fall-cone penetration and water content relationships of clays.* Geotechnique, **51**, 9: 819-821.
- BUDHU M. (1985) - *The effect of clay content on liquid limit from a fall cone and the british cup device.* Geotechnical Testing Journal GTJODJ, **8**, 2: 91-95.
- CANADIAN STANDARD ASSOCIATION AND BUREAU DE NORMALISATION DU QUEBEC (1986) - *CAN/BNQ 2501-032: Soils - Determination of limit liquid by the Swedish fall cone penetrometer method and determination of plastic limit.*
- CASADIO M. & ELMI C. (1995) - *Il Manuale del Geologo.* Pitagora Editrice Bologna, 519 pp.
- CASAGRANDE A. (1932) - *Research on the Atterberg limits of soils.* Public Roads, **13**, 8: 121-136.
- CASAGRANDE A. (1958) - *Notes on the design of the liquid limit device.* Geotechnique, **8**, 2: 84-91.
- CHERUBINI, C., PACCAPELO F. & RAMUNNI F.P. (2001) - *Compressibility behaviour of remoulded, fine grained soils and correlation with index properties: discussion.* Canadian Geotechnical Journal, **38**: 1152-1153.
- CHRISTARAS B. (1991) - *A comparison of the Casagrande and fall cone penetrometer methods for liquid limit determination in marls from Crete, Greece.* Engineering Geology, **31**: 131-14.
- COLOMBO P. (1974) - *Elementi di Geotecnica.* Zanichelli, Bologna, 290 pp.
- CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE - ENTE NAZIONALE ITALIANO DI UNIFICAZIONE (1964) - *CNR UNI 10014: Prove sulle terre. Determinazione dei limiti di consistenza (o di Atterberg) di una terra.*
- DRAGONI W., MELILLO M. & VINTI G. (2005) - *MAXLAB, a semi-expert procedure for classifying soils and for creating relational databases.* Geoitalia 2005, Epitome, 1, 271.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (2004) - *CEN ISO/TS 17892/3: Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 3: Determination of particle density - pycnometer method.*
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (2004) - *CEN ISO/TS 17892/12: Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 12: Determination of Atterberg limits.*
- ENTE NAZIONALE ITALIANO DI UNIFICAZIONE (2005) - *UNI CEN ISO/TS 17892/12: Indagini e prove geotecniche - Prove di laboratorio sui terreni - Parte 12: Determinazione dei limiti di Atterberg.*
- HANSBO S. (1957) - *A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test.* Proc. National Swedish Geotechnical Institute, 14.
- HOULSBY G.T. (1982) - *Theoretical analysis of the fall cone test.* Geotechnique, **32**, 2: 111-118.
- KARLSSON R. & VIBERG L. (1967) - *Ratio c/p' in relation to liquid limit and plasticity index with special reference to Swedish clays.* Proc. Geotechnical Conference, Oslo, Norway, 1: 43-47.
- KOUMOTO T. & HOULSBY G.T. (2001) - *Theory and practice of the fall cone test.* Geotechnique, **51**, 8: 701-712.
- LAMBE T.W. & WHITMAN R.V. (1979) - *Soil Mechanics.* John Wiley & Sons Inc.
- LANDRIS T.L. & FREEMAN R.B. (2007) - *An alternative test method for assessing consistency limits.* Geotechnical Testing Journal, **30**, 4: 793-798.
- LE ROEUIL S. & LE BIHAN J.P. (1996) - *Liquid limits and fall cones.* Canadian Geotechnical Journal, **33**: 793-798.
- LITTLETON M.D.M. & FARMILLO M. (1977) - *Some observations on limit liquid values.* Ground Engineering, **10**, 5: 39-40.
- MENDOZA M.J. & OROZCO M. (2001) - *Quick and reliable procedure for liquid limit determination of fine-grained soils.* Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, **24**, 1: 103-108.
- MOON C.F. & WHITE K.B. (1985) - *A comparison of liquid limit test results.* Geotechnique, **35**, 11: 59-60.
- NAGARAJ T.S., PANDIAN N.S., NARASIMHA RAJU P.S.R. (1991) - *An approach for prediction of compressibility and permeability behaviour of sand - bentonite mixes.* Indian Geotechnical Journal, **21**, 3: 271-282.
- NORMAN L.E.J. (1958) - *A comparison of values of liquid limit determined with apparatus having bases of different hardness.* Geotechnique, **8**, 2: 79-83.
- PRAKASH K. & SRIDHARAN A. (2002) - *Determination of liquid limit from equilibrium sediment volume.* Geotechnique, **52**, 9: 693-696.
- SAMPSON L.R. & NETTERBERG F. (1985) - *The cone penetration index: a simplex new soil index to replace the plasticity index.* Proceed. 11th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Eng., 2, 1041-1048.
- SEED H.B., ASCE M., WOODWARD R.J., ASCE F. & LUNDGREN N R. (1964) - *Clay mineralogical aspects of Atterberg limits.* Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, SM 4, 107-131.
- SHERWOOD P.T. & RYLEY M.D. (1970) - *An investigation of a cone penetrometer method for the determination of the liquid limit.* Geotechnique, **2**: 203-208.
- SKEMPTON A.W. (1944) - *Notes on the compressibility of clays.* Quarterly Journal of Geological Society London, C, 119-135.
- SKEMPTON A.W. (1957) - *Discussion: the planning and design of the new Hong Kong airport.* Proc. Inst. Civil Eng., London, **7**: 305-307.
- SRIDHARAN A. & NAGARAJ H.B. (2000) - *Compressibility behaviour of remoulded, fine grained soils and correlation with index properties.* Canadian Geotechnical Journal, **37**: 712-722.

INTERACTIONS BETWEEN GROUNDWATER AND RIVER MARTA (CENTRAL ITALY) AND PROBLEMS RELATED TO THE DEFINITION OF THE INSTREAM FLOW

- SRIDHARAN A. & PRAKASH K. (1998) - *Liquid limit and fall cone: discussion*. Canadian Geotechnical Journal, **35**: 407-408.
- SRIDHARAN A. & PRAKASH K. (2000) - *Percussion and cone methods of determining the liquid limit of soils: controlling mechanisms*. Geotechnical Testing Journal GTJODJ, **23**, 2: 236-244.
- SWEDISH STANDARD COMMISSION (1990) - *SS 027120: Geotechnical tests - cone liquid limit*. Swedish Standard Commission, Stockholm.
- TERZAGHI K. (1927) - *Determination of consistency of soils by means of penetration test*. Public Roads, **7**, 12: 240-247.
- TERZAGHI K. & PECK R.B. (1967) - *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 643 pp.
- WAGNER A.A. (1957) - *The use of Unified Soil Classification System for the Bureau of Reclamation*. Proc. 4th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Eng. London, **1**: 125-134.
- WASTI Y. (1987) - *Liquid and plastic limits as determined from the fall cone and the Casagrande methods*. Geotechnical Testing Journal GTJODJ, **10**, 1: 26-30.
- WASTI Y. & BEZIRCI M.H. (1986) - *Determination of the consistency limits of soils by the fall cone test*. Canadian Geotechnical Journal, **23**: 241-246.
- WHYTE I.L. (1982) - *Soil plasticity and strength - a new approach using extrusion*. Ground Engineering, **15**, 1: 16-24.
- WHYTE I.L. (1983) - *Cone penetrometer and liquid limit*. Geotechnique, **33** (1): 76-78.
- WESLEY L.D. (2003) - *Residual strength of clays and correlations using Atterberg limits*. Geotechnique, **53**, 7: 669-672.
- WOOD D.M. (1982) - *Cone penetrometer and liquid limit*. Geotechnique, **32**, 1: 152-157.
- WROTH C.P., WOOD D.M. (1978) - *The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils*. Canadian Geotechnical Journal, **15**, 2: 137-145.
- YOUSSEF M.S., EL RAMLI A.H. & EL DEMERY M. (1965) - *Relationship between shear strength, consolidation, liquid limit, and plastic limit for remoulded clays*. Proc. 6th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Eng., Montreal, **1**: 126-129.
- ZABARA V.G. (1968) - *Penetration method for determining the consistency limits of cohesive soils*. In: *Fundamentny i Mekhanika Gruntov*, **3**: 15-16.

Received Decembre 2007 - Accepted January 2008

