

METODI RAPIDI PER LA DETERMINAZIONE DEL LIMITE DI FLUIDITÀ'

G. MORALDI (*)

SOMMARIO - Nel presente studio viene esaminata la possibilità e la convenienza di estendere ai terreni italiani i metodi rapidi per la determinazione del limite di fluidità delle terre elaborati negli Stati Uniti.

Vengono esaminati sia il metodo proposto dal *Waterways Experiment Station*, sia quello del *Bureau of Public Roads*, i quali conducono a risultati equivalenti.

I limiti liquidi calcolati con il metodo del *Bureau of Public Roads* vengono quindi confrontati con quelli ottenuti con il metodo standard A.S.T.M., ed i risultati tradotti in tabelle e diagrammi.

Se ne conclude che l'accuratezza dei risultati che si consegue con i metodi rapidi è soddisfacente ai fini della classificazione delle terre, purché il numero dei colpi sia contenuto in un determinato intervallo.

E' tuttavia essenziale eseguire due determinazioni onde porsi al riparo da eventuali errori accidentali.

1 - Generalità

Una delle prove di « routine » che qualsiasi laboratorio Geotecnico è chiamato ad eseguire, è la determinazione del limite di fluidità di una terra o limite liquido (per usare una dizione linguisticamente non corretta ma ormai entrata nell'uso comune). La conoscenza di tale limite è infatti essenziale per poter procedere alla classificazione delle terre ed alla loro accettazione per l'impiego nei manufatti (argini, rilevati, fondazioni in terra stabilizzata ecc.).

La procedura di esecuzione di questa prova è stata normalizzata in tutti i paesi dove esistono Norme Ufficiali riguardanti le prove sui terreni (1), ed anche negli altri ci si attiene ormai a tale procedura normalizzata.

Questa, come è noto, prevede l'impiego del cucchiaio di Casagrande, e la esecuzione di almeno tre determinazioni con contenuti diversi di acqua, onde poter individuare graficamente in un diagramma semilogaritmico, mediante il tracciamento della cosiddetta linea di fluidità (*flowline*), l'umidità corrispondente al numero di colpi di 25.

In pratica però è opportuno che le determinazioni sieno in numero maggiore di tre, per poter tracciare con sicurezza la retta anzidetta, scartando eventuali errori accidentali, tutt'altro che infrequenti, e sui quali si tornerà a parlare più dettagliatamente in seguito.

Onde snellire l'esecuzione della prova, sono stati proposti dei metodi rapidi che dovrebbero consentire

di fare a meno del tracciamento della linea di fluidità e di individuare il limite liquido mediante la determinazione di un sol punto con il cucchiaio di Casagrande.

I metodi proposti sono sostanzialmente due: il primo dovuto al *Waterways Experiment Station* del Corpo del Genio Militare Statunitense, descritto in una pubblicazione del 1949 [1], il secondo proposto da COOPER e JOHNSON dell'Amministrazione delle Strade dello Stato di Washington [2], successivamente ripreso e modificato da OLMSTEAD e JOHNSTON del *Bureau of Public Roads* [3].

Metodo W.E.S.

Il metodo del *Waterways Experiment Station*, basandosi su prove eseguite su campioni di terreno prelevati nella valle del Mississippi e nelle vicinanze, determina il limite liquido mediante la relazione:

$$(1) \quad LL = W_n \left(\frac{N}{25} \right)^{0,121}$$

dove LL è il limite liquido, N il numero di colpi a cui si è chiuso il solco nel cucchiaio di CASAGRANDE, W_n l'umidità della porzione di terreno prelevata intorno al tratto di chiusura.

Per risolvere speditamente la relazione (1) è stato proposto il nomogramma riportato dalla Fig. 1, il cui impiego è immediato.

Come si rileva dal nomogramma il numero dei colpi entro cui si deve ottenere la chiusura del solco è compreso fra 15 e 35 (2).

(2) Il nomogramma originale si arrestava al valore di $LL = 20$, ed era previsto per un numero di colpi compreso fra 15 e 40.

A seguito del presente studio si è riscontrata la possibilità di estenderne la validità a valori di LL inferiore a 20, nonché la convenienza di limitare il numero di colpi ad un intervallo più ristretto.

(*) Dott. Ing. Giorgio MORALDI, Capo del Laboratorio Geotecnico del Demanio Aeronautico - Ciampino, Assistente dell'Istituto di Costruzioni Stradali e Ferroviarie dell'Università di Roma.

(1) Basterà citare per tutte le Norme dell'*American Society for Testing Materials*, A.S.T.M. (prova D 423-39), dell'*American Association of State Highway Officials*, A.A.S.H.O. (prova T 89-49) del *British Standard Institution*, B.S.I.; della *Junta Autónoma de Estradas* del Ministero dei LL. PP. Portoghese (prova J.A.E.S. 3-53).

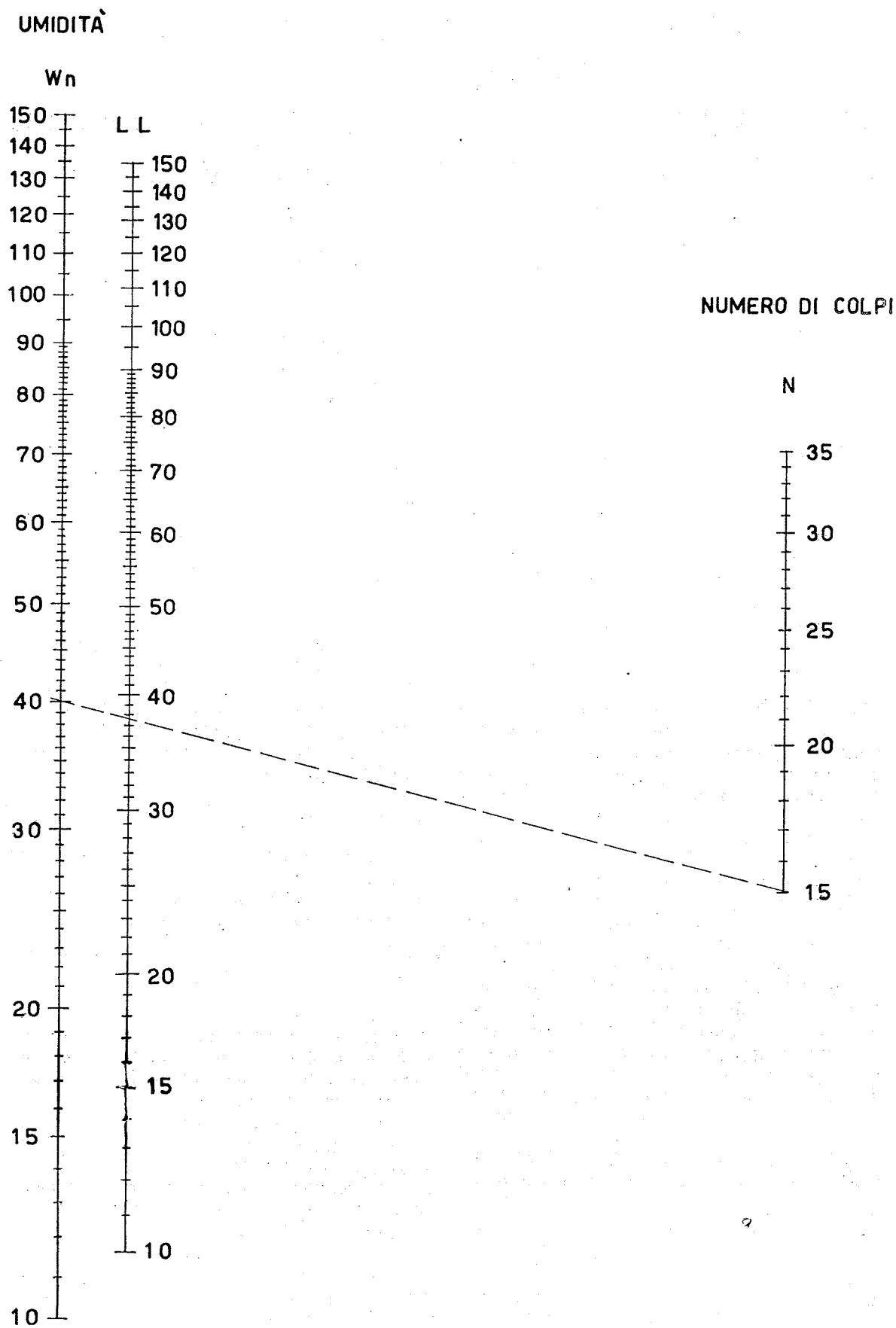


Fig. 1 - Nomogramma per la determinazione del limite liquido con il metodo W. E. S.

Soluzione grafica dell'equazione $LL = W_n \left(\frac{N}{25} \right)^{0,121}$

Secondo Metodo

Questo metodo venne originariamente elaborato da COOPER e JOHNSON come un metodo grafico, basato sulla osservazione che la inclinazione delle linee di fluidità tracciate nel diagramma semilogaritmico $N = f(W_n)$ è praticamente costante per terreni di eguale limite liquido, indipendentemente dalla natura del terreno stesso, cosicché una volta tracciata una serie di queste rette per diversi valori del limite liquido (v. Fig. 2) è possibile, riportando nel diagramma un punto determinato con il cucchiaino di CASA-GRANDE, e tracciando per esso la parallela alla linea di fluidità più prossima, determinare il limite liquido della terra in corrispondenza della intersezione di tale retta con la orizzontale passante per i 25 colpi.

La modifica introdotta da OLMSTEAD e JOHNSTON [3] è consistita nel ricavare, attraverso l'equazione delle linee di fluidità, l'espressione che segue per la determinazione del limite liquido e nell'estendere notevolmente la validità del metodo, indagando su quasi tutti i terreni della Confederazione Americana:

$$(2) \quad LL = W_n \frac{1}{1,419 - 0,3 \log N}$$

dove i simboli hanno lo stesso significato di quelli della espressione (1).

Onde semplificare i calcoli, nella tabella 1 è stato calcolato il valore del termine

$$\frac{1}{1,419 - 0,3 \log N}$$

in funzione del numero di colpi N .

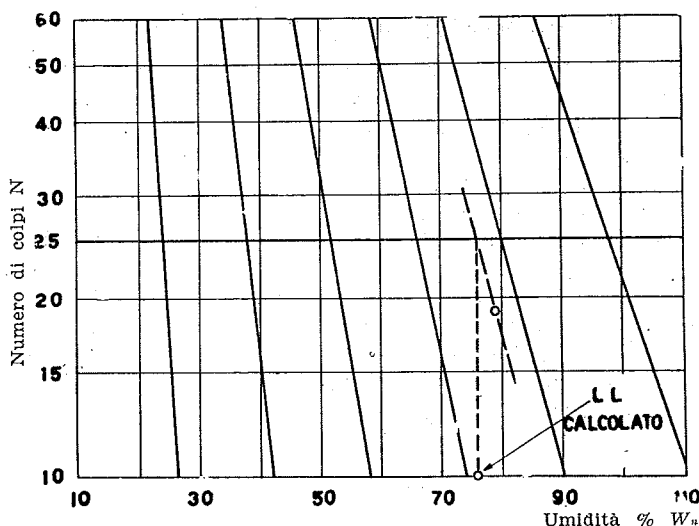


Fig. 2 - Metodo grafico per la determinazione del limite liquido

2 - Applicabilità dei metodi rapidi ai terreni italiani

Lo scopo del presente studio, in analogia a quanto fatto da altri sperimentatori in Brasile [4], e nell'Africa Equatoriale Portoghese [5], è quello di verificare l'applicabilità dei metodi rapidi anzidetti ad alcuni terreni italiani, di paragonare fra loro i risultati conseguiti con i due metodi onde esprimere un

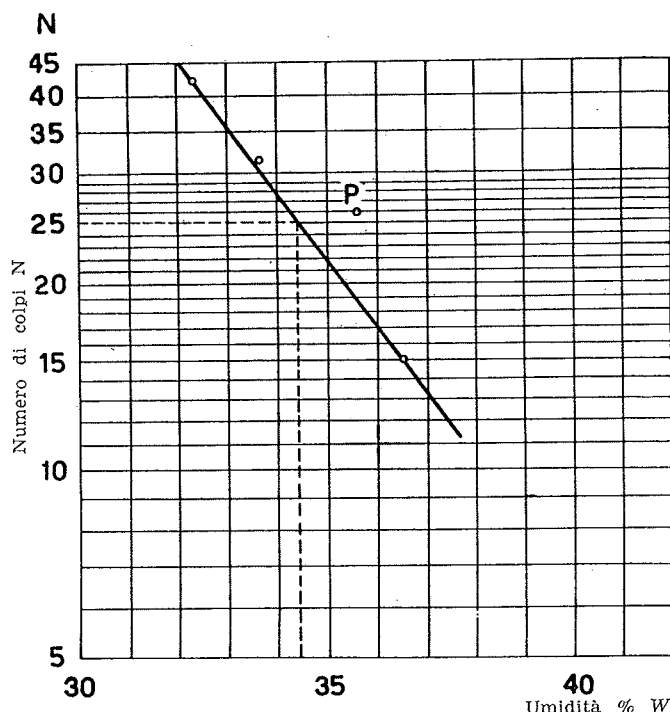


Fig. 3 - LL determinato mediante la linea di fluidità: $N = f(W_n)$ (Metodo standard A.S.T.M.)

criterio preferenziale di scelta, di vedere di estendere il campo di applicabilità ai limiti di fluidità inferiori a 15, e di studiare infine l'influenza del numero dei colpi e del valore del limite sulla precisione dei risultati ottenuti.

Ci si è serviti per questo dei dati raccolti dal Laboratorio Geotecnico dell'Aeronautica a Ciampino e da qualche laboratorio di cantiere, riguardanti 221 campioni, comprendenti non solo terreni del tipo più vario e di provenienza più diversa (che vanno dalla Sicilia e dalle Puglie al Lazio, alla Toscana, al Piemonte e al Veneto) ma anche misti granulari per fondazioni, allorchando i loro limiti liquidi risultavano suscettibili di determinazione.

3 - Raccolta dei dati ed eliminazione degli errori accidentali

Di questi campioni era noto il limite liquido determinato secondo la procedura Standard A.S.T.M. (mediante cioè il tracciamento per punti della retta di fluidità nel diagramma semilogaritmico di Fig. 3) ed erano altresì note le umidità ed il numero dei colpi corrispondenti ai singoli punti, che erano serviti a tracciare la retta anzidetta.

E' stato quindi possibile, partendo dal valore della umidità W_n e del numero dei colpi N che individua ciascun punto, calcolare mediante i due metodi rapidi esaminati il limite liquido e confrontare i valori così ottenuti con il valore determinato con il metodo Standard.

Raggruppando i risultati in relazione agli scarti osservati, divisi in gruppi di 0,5 in 0,5, si è ricavato il numero di determinazioni comprese in ciascun gruppo di errore, e quindi la percentuale delle determinazioni cui corrisponde un dato errore massimo.

Si è fatto volutamente riferimento ai valori nume-

TABELLA N. 1

Valori del termine: $\frac{1}{1.419 - 0,3 \log N}$ in funzione del numero di colpi N .

N	1		
	$1.419 - 0,3 \log N$		
5	0,827	26	1,005
6	0,843	27	1,010
7	0,858	28	1,015
8	0,871	29	1,020
9	0,883	30	1,025
10	0,894		
11	0,903	31	1,029
12	0,913	32	1,033
13	0,922	33	1,037
14	0,930	34	1,042
15	0,938	35	1,046
16	0,944	36	1,050
17	0,952	37	1,055
18	0,959	38	1,058
19	0,966	39	1,062
20	0,972	40	1,065
21	0,978	41	1,068
22	0,983	42	1,072
23	0,989	43	1,075
24	0,995	44	1,079
25	1,000	45	1,082

rici degli errori e non al loro valore percentuale (riferito cioè al valore del LL relativo) in quanto, ai fini della classificazione e dell'accettazione delle terre, uno scarto di una unità ha la medesima influenza sia che esso si riferisca ad un limite liquido basso che ad uno più elevato.

Una prima osservazione importante, che scaturisce dal confronto, riguarda gli errori accidentali in cui si può incorrere nella determinazione per punti del limite liquido con il metodo Standard. Esaminando infatti le rette $N = f(W_n)$ tracciate nel diagramma semilogaritmico, si osserva che talora un punto del diagramma può scostarsi notevolmente dalla retta stessa, come a titolo di esempio è dato osservare nella Fig. 3 per il punto P , caratterizzato dalla umidità del 35,6% e dal numero di colpi di 26. Tali scostamenti sono da attribuire ad errori accidentali che non sono del tutto evitabili neppure ricorrendo ad operatori sperimentati ed alla determinazione della umidità mediante essiccazione in stufa termostatica.

La presenza di questi errori, a parte i riflessi che può avere sulla procedura di esecuzione della prova standard (3) ha due conseguenze importanti nei riguardi dell'applicabilità dei metodi rapidi: anzitutto nel presente studio ha portato ad eliminare questi

(3) Che si traduce, come è stato già accennato all'inizio, nella opportunità di determinare la retta di fluidità con più di tre punti, onde poter scartare un risultato anomalo.

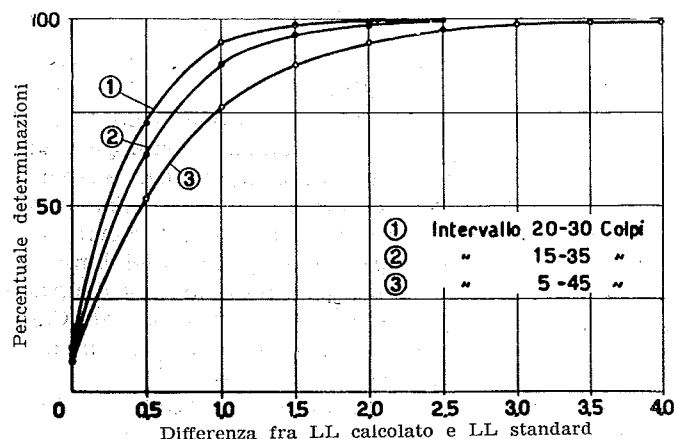


Fig. 4 - Percentuali delle determinazioni del LL calcolato con metodi rapidi, affette da errore compreso entro uno scarto prestabilito, per diversi intervalli del numero dei colpi.

punti nel confronto da effettuare (in quanto trattasi di errori non imputabili alla procedura rapida, ma insiti nel metodo standard stesso) ed in secondo luogo, qualora si addivenga all'adozione di un metodo rapido, obbliga ad effettuare due determinazioni con il cucchiaino di CASAGRANDE, confrontandone i risultati, onde mettersi al riparo da un eventuale errore accidentale non altrimenti rilevabile.

Dai 221 campioni di terreno esaminati si ricavano 1026 determinazioni, che si riducono a 927 adottando il criterio di considerare come errore accidentale, e quindi di eliminare, tutti i punti che nei diagrammi di Fig. 3 si scostano dalla retta di un valore di umidità superiore all'1% (4).

4 - Equivalenza dei due metodi rapidi

Il confronto dei risultati ottenuti con i due metodi rapidi porta a concludere sulla loro equivalenza a tutti gli effetti pratici, in quanto le differenze fra i limiti calcolati nei due modi sono sempre largamente compresi nella massima approssimazione ottenibile con i metodi stessi. Se ne ha del resto conferma risolvendo le relazioni (1) e (2) e confrontandone i risultati in corrispondenza dei limiti liquidi più elevati e dei numeri di colpi estremi della scala.

Di conseguenza si è potuto limitare il confronto con il metodo standard ad uno solo dei metodi rapidi, e precisamente al metodo B.P.R., in quanto i risultati sono validi anche per l'altro.

5 - Presentazione ed esame dei risultati

I risultati che scaturiscono dal confronto fra i limiti liquidi calcolati con il metodo rapido B.P.R. ed i limiti liquidi standard sono stati raccolti nelle tabelle n. 2 e n. 3 raggruppando per intervalli di numero di colpi e di limiti liquidi il numero di determinazioni effettuate con il metodo rapido che presentano uno scostamento prestabilito dal LL standard.

(4) Questo criterio può sembrare piuttosto arbitrario, ma è stato dettato dalla considerazione di ritenere ammissibile un errore di una unità sul valore del LL come meglio verrà chiarito in seguito.

Il contenuto delle tabelle può essere presentato sotto forma grafica nei diagrammi di Fig. 4 e 5.

Le curve riportate nella Fig. 4 sono state ottenute congiungendo i punti rappresentanti le percentuali progressive del numero delle determinazioni che presentano una differenza tra LL calcolato e LL standard minore o uguale agli scarti riportati in ascisse, e ciò per diversi intervalli di numero di colpi *N*.

Da esse si osserva che per l'intervallo di *N* compreso fra 5 e 45 il 76% delle determinazioni presenta uno scarto inferiore o uguale ad uno, il 93,5% uno scarto inferiore o uguale a due, ed il 98% (cioè praticamente la totalità delle osservazioni) uno scarto inferiore o uguale a tre.

Col diminuire dell'intervallo la precisione aumenta; infatti per 15÷35 colpi l'88% delle determinazioni presenta uno scarto inferiore o uguale ad uno, ed il 99% uno scarto inferiore o uguale a due, ed aumenta ancora se si limita ulteriormente l'intervallo a 20÷30 colpi. Questi risultati concordano con quanto trovato da OLMSTEAD e JOHNSTON e dal *Waterways Experiment Station*.

L'influenza del valore del limite liquido sulla precisione dei risultati è posto in evidenza dal diagramma di Fig. 5 relativo ad un intervallo di *N* compreso fra 15 e 35 colpi.

Si osserva che la precisione stessa non è sensibil-

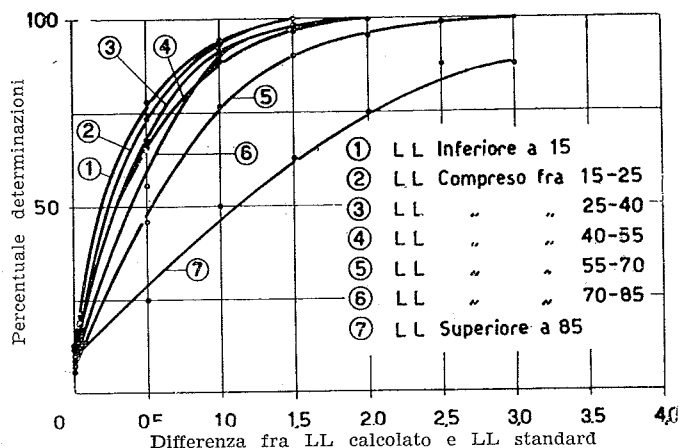


Fig. 5 - Percentuali delle determinazioni del LL calcolato con metodi rapidi, affette da errore compreso entro uno scarto prestabilito, per diversi intervalli di valore del LL - Numero di colpi compreso fra 15 e 35.

mente influenzata dal valore del limite liquido, anche se questo scende al di sotto di 15, dimostrando in tal modo la possibilità di estendere la validità dei metodi rapidi a valori inferiori a quelli determinati in origine. L'errore diventa sentito per limiti liquidi superiori a 85, quantunque la percentuale dei dati sperimentali raccolti al di sopra di tale valore è così

TABELLA N. 2

Numero e percentuali delle determinazioni del limite liquido calcolato con metodi rapidi, suddivise per intervalli di errori e di numero di colpi.

Differenza fra LL calcolato e LL standard	Intervallo numero di colpi 5 - 45			Intervallo numero di colpi 15 - 35			Intervallo numero di colpi 20 - 30		
	N° determinazioni parziali	N° determinazioni progressive	% determinazioni progressive	N° determinazioni parziali	N° determinazioni progressive	% determinazioni progressive	N° determinazioni parziali	N° determinazioni progressive	% determinazioni progressive
0	73	73	7,9	54	54	9,4	42	42	11,4
0,1 - 0,5	405	478	51,6	304	358	62,5	229	271	73,4
0,6 - 1,0	230	708	76,4	144	502	87,6	75	346	93,7
1,1 - 1,5	105	813	87,7	45	547	96,0	18	364	98,6
1,6 - 2,0	53	866	93,5	16	563	98,7	4	368	99,7
2,1 - 2,5	34	900	97,1	5	568	99,6	1	369	100
2,6 - 3,0	9	909	98,1	1	569	99,8	—	—	—
3,1 - 3,5	8	917	99,0	0	569	99,8	—	—	—
3,6 - 4,0	3	920	99,4	0	569	99,8	—	—	—
> 4	7	927	100,0	1	570	100	—	—	—

TABELLA N. 3

Numero e percentuali delle determinazioni del limite liquido calcolato con metodi rapidi suddivise per intervalli di errore e di limite liquido. Numero di colpi compreso fra 15 e 35.

Differenza fra LL calcolato e LL standard	LL ≤ 15			LL = 15÷25			LL = 25÷40			LL = 40÷55			LL = 55÷70			LL = 70÷85			LL > 85		
	N° determinazioni parziali	N° determinazioni progressive	% determinazioni progressive	N° determinazioni parziali	N° determinazioni progressive	% determinazioni progressive	N° determinazioni parziali	N° determinazioni progressive	% determinazioni progressive	N° determinazioni parziali	N° determinazioni progressive	% determinazioni progressive	N° determinazioni parziali	N° determinazioni progressive	% determinazioni progressive	N° determinazioni parziali	N° determinazioni progressive	% determinazioni progressive	N° determinazioni parziali	N° determinazioni progressive	% determinazioni progressive
0	1	1	5,6	3	3	8,8	20	20	9,4	19	19	11,6	6	6	7,1	4	4	8,5	1	1	12,5
0,1 - 0,5	13	14	7,8	22	25	73,5	124	144	67,3	89	108	65,8	33	39	45,9	22	26	55,4	1	2	25,0
0,6 - 1,0	3	17	94,5	7	32	94,0	52	196	91,6	37	145	88,5	26	65	76,5	17	43	91,5	2	4	50,0
1,1 - 1,5	0	17	94,5	2	34	100,0	14	210	98,2	13	158	96,4	12	77	90,5	3	46	98,0	1	5	62,5
1,6 - 2,0	1	18	100,0	0	—	—	4	214	100,0	5	163	99,4	4	81	95,3	1	47	100,0	1	6	75,0
2,1 - 2,5	0	—	—	0	—	—	0	—	—	1	164	100,0	3	84	98,8	0	—	—	1	7	87,5
2,6 - 3,0	0	—	—	0	—	—	0	—	—	0	—	—	1	85	100,0	0	—	—	0	7	87,5
3,1 - 3,5	0	—	—	0	—	—	0	—	—	0	—	—	0	—	—	0	—	—	0	7	87,5
3,6 - 4,0	0	—	—	0	—	—	0	—	—	0	—	—	0	—	—	0	—	—	0	7	87,5
> 4,0	0	—	—	0	—	—	0	—	—	0	—	—	0	—	—	0	—	—	1	8	100,0

N.B. - In ogni intervallo di limite liquido deve intendersi escluso il valore inferiore e compreso quello superiore.

esigua da non fornire più risultati statisticamente attendibili.

Alquanto spostato dalle altre appare l'andamento della curva relativa ai limiti liquidi compresi fra 55 e 70, che potrebbe far pensare ad un aumento dell'errore col crescere del valore del *LL* se non fosse contraddetta dall'andamento della curva dei limiti liquidi successivi, compresi fra 70 ed 85.

Onde spiegare questo comportamento si sono esaminati i valori delle umidità e del numero dei colpi dei punti che sono serviti al tracciamento della retta di fluidità, per vedere se esso non fosse dovuto ad un casuale addensarsi di errori accidentali di valore inferiore all'unità (tali cioè da non essere scartati nello spoglio dei risultati).

Indubbiamente questo fenomeno si è verificato, ma non in misura tale da spiegare completamente lo scostamento della curva; per far questo occorrerà probabilmente avere la possibilità di esaminare maggior copia di dati sperimentali nel campo dei limiti liquidi elevati.

Comunque sia, anche per l'intervallo in questione, l'errore osservato non è tale da invalidare l'applicabilità dei metodi rapidi, in quanto il 95% delle osservazioni risulta presentare uno scostamento inferiore a 2 dal limite liquido standard.

Prima di formulare, in base a questi risultati, delle conclusioni riguardanti l'applicabilità dei metodi rapidi alla determinazione del limite liquido in laboratorio, è opportuno soffermarsi sul valore dello scarto massimo ammissibile nella esecuzione di questa prova.

Si osserva anzitutto che, anche nella determinazione dei *LL* con il metodo standard, il grado di esattezza conseguibile non è molto elevato, e dipende in misura notevole dalla abilità dell'operatore; anche con operatori allenati è illusorio ricercare una approssimazione superiore a 0,5 sia per le incertezze insite nell'apprezzare l'umidità, sia per la interpolazione grafica cui si ricorre nel tracciamento della retta di fluidità (5).

L'approssimazione quindi conseguita con i metodi rapidi, purché si limiti l'intervallo del numero di colpi a 15÷35 (o ad un intervallo ancora più ristretto se occorre maggior precisione), e si ripetano le determinazioni due volte, onde rivelare eventuali errori accidentali, è più che soddisfacente ai fini della classificazione delle terre.

Può se mai sorgere qualche dubbio nei casi in cui ci si trovi in corrispondenza di valori che individuano il punto di passaggio fra un gruppo e l'altro in una determinata classificazione, o di valori prossimi al limite di accettazione o di rigetto di materiali granulari per fondazioni, nel qual caso, ad evitare contestazioni, può essere opportuno ricorrere al metodo standard.

6 - Conclusioni

Le conclusioni che si possono trarre da quanto precede sono perciò le seguenti:

1) Rimane confermata la possibilità di estendere alle terre del nostro paese i metodi rapidi elaborati dal *Waterways Experiment Station* (W.E.S.) e dal *Bureau of Public Roads* (B.P.R.) per la determinazione del limite liquido con un notevole vantaggio per la rapidità di esecuzione della prova.

2) L'adozione dell'uno o dell'altro metodo è senza conseguenze ai fini dell'errore che si commette; potrà quindi essere impiegato sia il nomogramma di Fig. 1 sia la formula (2) unitamente alla tabella 1.

3) La precisione che si consegue è sufficiente a tutti gli effetti pratici inerenti alla classificazione delle terre, in quanto lo scarto massimo rimane al di sotto di una unità nell'88% ed al di sotto di 2 unità nel 99% delle determinazioni, purché si limiti la chiusura del solco nel cucchiaino di CASAGRANDE ad un numero di colpi compreso fra 15 e 35.

Una maggiore precisione si può ulteriormente conseguire limitando il numero dei colpi all'intervallo 20÷30, nel qual caso la percentuale delle determinazioni che presentano uno scarto inferiore o eguale ad una unità sale al 94%.

Può solo sorgere qualche dubbio sulla convenienza di applicare i metodi rapidi allorché si tratti dell'accettazione di materiali aventi un *LL* prossimo al limite di accettazione, nel qual caso, ad evitare dubbi, può essere conveniente ricorrere al metodo standard.

4) E' però assolutamente necessario, onde garantirsi da eventuali errori accidentali, che la determinazione venga effettuata due volte, alla stessa o a diverse umidità e che i risultati non differiscano dalla media più dello scostamento ammesso.

Bibliografia

- [1] *Corps of Engineers U.S. Army; Waterways Experiment Station - Simplification of the Liquid Limit Test Procedure - Report N. 1 - giugno 1949.*
- [2] J. H. COOPER e K. A. JOHNSON - *A Rapid Method of Determining the Liquid Limit of Soils - Washington State Dept. of Highways, Materials Laboratory - Report n. 83 - marzo 1950.*
- [3] F. R. OLMSTEAD e C. M. JOHNSTON - *A comparison of Rapid Methods for the Determination of Liquid Limits of Soils - Public Roads, vol. 28, N. 3, agosto 1954*
- ed anche: *Rapid Methods for Determining Liquid Limit of Soils - Highway Research Board, Bulletin N. 95 - 1955.*
- [4] MURILO LOPES DE SOUZA - *Determinação do Limite de Liquidez Com om sô Ponto Aplicação aos Solos Brasileiros, 1955.*
- [5] M. J. FORJAS DE SAMPAIO - *Método Rapido para a Determinação do Limite Liquido Aplicação aos Solos de Moçambique - Bolitin da Sociedade de Estudos de Moçambique - Ano XXVI, N. 97 - Marzo-Aprile 1956.*

(5) Questa conclusione è del resto confermata da alcune ricerche coordinate condotte negli Stati Uniti da diversi laboratori stradali onde determinare il grado di ripetibilità dei risultati fra vari operatori e l'errore medio pro-

babile commesso [3]. Quest'ultimo è stato trovato non inferiore al 2% del valore del *LL*, il che corrisponde a scarti assoluti compresi fra 0,3 e 1,0 per *LL* rispettivamente di 15 e 50.