

Determinación de los límites de Atterberg mediante el cono de caída libre en suelos españoles: aplicación al límite líquido

COVADONGA PALENCIA COTO (*); MIGUEL CELEMÍN MATACHANA (**); JOSÉ MANUEL SÁNCHEZ ALCITURRI (***)

RESUMEN Sobre suelos procedentes de varias provincias españolas se han realizado ensayos de penetración con el cono de caída libre, complementados con otros ensayos de resistencia, además de los habituales ensayos de identificación. En esta primera publicación se presentan los resultados obtenidos al comparar la determinación del límite líquido según la norma UNE con las dos metodologías basadas en el empleo del cono: utilización de una recta de calibración y asignación determinista de una penetración para la consistencia del límite líquido. De la comparación efectuada se ha obtenido la práctica equivalencia entre el límite líquido obtenido según la norma UNE con la metodología basada en el empleo de la recta de calibración.

DETERMINATION OF THE ATTERBURG LIMITS BY MEANS OF THE FREE FALL CONE ON SPANISH SOILS: APPLICATION TO THE LIQUID LIMIT

ABSTRACT Penetration tests have been effected, using the free fall cone, on soils proceeding from several Spanish provinces, and complemented by endurance tests as well as the usual identification tests. This initial publication presents the results obtained from the comparison between the determination of the liquid limit in accordance with the UNE standard and the two methodologies based on the use of the cone: use of a calibration line and the deterministic allocation of a penetration for the consistency of the liquid limit. From this comparison, the practical equivalence has been obtained between the liquid limit obtained in accordance with the UNE standard and the methodology based on the use of the calibration line.

Palabras clave: Atterberg; Cono; Ensayos; Calibración.

1. INTRODUCCIÓN

La determinación de los límites de Atterberg se viene haciendo, en España, según los métodos convencionales: el de la cuchara de Casagrande para el límite líquido y el de los cilindros de suelo para el límite plástico. La experiencia acumulada sobre sus numerosas aplicaciones es considerable y el balance global de su utilización es, sin duda, positivo. Hay, sin embargo, algunos aspectos de estos ensayos que resultan llamativos en el momento actual, uno de ellos es el de su carencia de base científica por lo que en varios países se viene registrando desde hace unos años y en forma intermitente, una cierta atención hacia el empleo del cono de caída libre para la determinación de ambos límites.

Es escasa la experiencia en nuestro país sobre el ensayo del cono de caída libre y su aplicación a suelos españoles, no habiendo podido los autores localizar referencias bibliográficas

relativas a ello. Hay por tanto una doble motivación en la realización del trabajo del que este artículo es primera parte: por un lado, enriquecer la experiencia que internacionalmente existe sobre este ensayo con la incorporación de suelos españoles y por otro, tratar de aportar alguna nueva idea o perspectiva sobre el tema, aportación que, lógicamente, debe establecer puentes con los métodos convencionales de determinación de los límites de Atterberg.

2. EL ENSAYO DEL CONO DE CAÍDA LIBRE

Es conocida la relación del cono de caída libre con el trabajo realizado entre 1914 y 1922 por la comisión geotécnica que se creó en Suecia para estudiar las inestabilidades observadas en algunos taludes y terraplenes de las líneas estatales de ferrocarril. El cono de caída libre (Fall-cone) ya fue utilizado entonces para las aplicaciones que hoy se siguen haciendo de él: estimación de la resistencia al corte y de la consistencia de los suelos arcillosos, si bien la primera se medía a través de un "strength number" mientras que la segunda de las aplicaciones se limitaba a la determinación del límite líquido (fineness number), (Skempton, 1985).

La mecánica del ensayo se ha mantenido desde entonces y consiste esquemáticamente en lo siguiente: un cono recto

(*) Licenciado en Ciencias Químicas. Universidad de León.

(**) Dr. Ingeniero de Caminos. Universidad de León.

(***) Dr. Ingeniero de Caminos. Universidad de Cantabria.

de peso y geometría conocidas se suspende verticalmente de forma que su vértice toque la superficie de una masa de suelo a la que debe ser perpendicular y a continuación, se libera el cono del mecanismo de suspensión, permitiéndosele que penetre en el suelo durante un cierto periodo de tiempo. Los resultados del ensayo son la penetración del cono y la humedad del suelo determinada en la zona en la que se produjo aquélla.

A partir de la penetración, el ensayo del cono permite obtener una estimación de la resistencia, ya que es en sí mismo un ensayo de resistencia (Wroth y Wood, 1978). La resistencia al corte sin drenaje (c_u) está relacionada con la penetración "d" producida por un cono de peso "W" mediante la fórmula:

$$c_u = K \frac{W}{d^2} \quad [1]$$

deducida experimentalmente por Hansbo (1967) y confirmada mediante análisis dimensional por Wroth y Wood (1978); la constante "K" depende de la geometría del cono y de la fricción, medida esta última, por ejemplo, por el cociente entre la adhesión y la resistencia al corte sin drenaje, (Houlsby, 1982).

Las primeras aplicaciones del cono estuvieron orientadas fundamentalmente hacia la determinación del límite líquido, habiendo llegado a ser recogida dicha aplicación como norma oficial de ensayo en algunos países tales como la antigua URSS, Bulgaria, Reino Unido y Canadá.

En la determinación del límite líquido mediante el cono hay dos opciones: la primera, definirlo empíricamente como la humedad correspondiente a una cierta penetración, y la segunda, deducir su valor mediante una recta de calibración fijada de tal modo que el resultado sea coincidente con el obtenido mediante el método de la cuchara de Casagrande. La primera opción es la más frecuente, habiendo sido adoptada por la normativa británica (BS:1377-1990). Entre los que siguieron la segunda opción se encuentran el Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées, (LeFlaive, 1971) y Tumay y Yilmaz, 1980; el procedimiento consiste en situar el límite líquido obtenido por el método de Casagrande sobre la recta humedad-penetración de un suelo, determinar a continuación la recta de ajuste de los puntos resultantes de un grupo de suelos y definir el límite líquido de cualquier otro como la humedad correspondiente a la intersección de esta recta con la recta humedad-penetración de dicho suelo.

Entre los últimos trabajos sobre el cono de caída libre se encuentran algunos relativos a la posible aplicación de este ensayo a la determinación del límite plástico o del índice de plasticidad. Todos ellos tienen en común la asunción de la hipótesis —deducida experimentalmente (Skempton y Northey, 1953)— de que la resistencia al corte sin drenaje en el límite plástico es cien veces superior a la que un suelo tiene en su límite líquido. Tres desarrollos de esta idea pueden ser identificados: cronológicamente, éstos serían los de Wroth y Wood, 1978, Belviso et al., 1985 y Harison, 1988.

El método propuesto por Wroth y Wood requiere el empleo de dos conos geométricamente similares pero de distinto peso, pudiéndose deducir el índice de plasticidad (IP) de la fórmula:

$$IP = D \frac{100}{L \left(\frac{W_1}{W_2} \right)} \quad [2]$$

en la que W_1 y W_2 son los pesos de los conos utilizados y D, la separación vertical existente entre las rectas penetración-humedad, en escala semilogarítmica para la primera variable.

El procedimiento sugerido por Belviso et al. sólo requiere el uso de un cono, deduciéndose el índice de plasticidad de la pendiente de la recta logaritmo de la penetración-humedad.

Por último, Harison identifica para cada suelo y en la gráfica penetración-humedad en coordenadas semilogarítmicas, una línea constituida por dos tramos rectos la cual, normalizada con el índice de fluidez, da como resultado una penetración de 2 mm para el límite plástico. En el procedimiento propuesto por Harison ha de utilizarse el cono de 80 gramos y 30° de ángulo cónico.

Debe señalarse, para finalizar estas notas relativas al cono de caída libre, que se trata de un ensayo cuyas características se ajustan a las conocidas recomendaciones de Casagrande (1958) relativas a la técnica para la determinación del límite líquido; que la investigación sobre la utilización de dicho ensayo para la determinación del límite plástico va cobrando relevancia, con lo que es de esperar que en un futuro no muy lejano se pueda aplicar a dicha finalidad; que, en fin, uno de los aspectos más destacables del ensayo es el de la buena reproducibilidad de los resultados de la penetración, tanto en lo relativo a la repetibilidad como en lo que hace referencia a la influencia de la técnica de ensayo, aspectos todos ellos valorados muy satisfactoriamente (Sherwood y Ryley, 1968; Garneau y LeBihan, 1977). Todos estos aspectos junto a la lógica preocupación de los investigadores por aprovechar la abundante experiencia acumulada con la utilización de los límites de Atterberg, estableciendo correlaciones entre éstos y los resultados obtenidos con el cono, justifican y motivan la continuación de los trabajos de investigación sobre este ensayo y por otro lado, y ya en el ámbito de nuestro país, propiciar su adopción como ensayo estándar de identificación de los suelos arcillosos.

En este trabajo se ha realizado un estudio sobre la determinación del límite líquido de un suelo, comparando los resultados obtenidos con el método de Casagrande y con el ensayo del cono de caída libre.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

En la presente campaña se ha trabajado sobre ocho suelos arcillosos procedentes de varias provincias españolas. En la Tabla 1 se muestra el número de identificación, origen geológico y procedencia de cada uno de ellos.

Suelo nº	Procedencia
1	Huelva (Cuaternario)
2	Huelva (Cuaternario)
3	Santander (Triásico)
4	León (Artificial*)
5	Bezóna, Cantabria, (Descalificación)
6	Piedrafita, Galicia, (Descalificación)
7	León, (Terciario)
8	León, (Cuaternario)

[*] Se trata de una mezcla del suelo nº 8 con aproximadamente un 10-12% de carbón, la cual se utiliza como materia prima para la fabricación de materiales cerámicos.

TABLA 1. Procedencia y origen geológico de los suelos utilizados en el estudio.

Suelo nº	LL (%)	LP (%)	IP (%)	%<2 µm	Act.	g.
1	57	25	32	52	0.62	2.55
2	61	22	39	52	0.75	2.55
3	53	24	29	48	0.60	2.60
4	37	19	18	36	0.50	2.52
5	59	20	39	44	0.89	2.60
6	40	21	19	35	0.54	2.60
7	34	20	14	31	0.45	2.61
8	48	27	21	48	0.44	2.65

TABLA 2. Propiedades de los suelos ensayados.

Con cada uno de estos suelos se han realizado varias series de ensayos, cada una de las cuales incluía: a) realización de al menos tres determinaciones consistentes de la penetración con los conos de 80, 130 y 190 gramos de masa y 30° de ángulo apical y del número de golpes en la cuchara de Casagrande, b) una determinación de la resistencia al corte con el vane de laboratorio y otra con un molinete de bolillo, modificado.

Por último, para cada suelo se realizaron varias determinaciones de los límites de Atterberg según las normas UNE-7377/76 y UNE-7378/75, una de peso específico de las partículas y una granulometría por sedimentación. En la tabla número 2 se muestran las propiedades de los suelos ensayados.

Al efectuar una de las series de ensayos sobre la arcilla gris del aluvial del Guadiana en Huelva, —transcurridas algunas semanas desde la realización de la última de ellas— se observó una variación importante en la plasticidad de este suelo, tal y como puede verse en la tabla 2. Por este motivo se han considerado dos suelos distintos (1 y 2) bajo una misma descripción y origen.

3.1. TÉCNICA DE ENSAYO

Dentro de la observancia de las normas antes citadas en lo referente a la preparación de las muestras y a la metodología de ensayo, se han introducido algunas exigencias adicionales con el fin de obtener resultados más consistentes.

Así, en la determinación del límite líquido por el método de Casagrande, el número de golpes se obtenía como media aritmética de los resultados de tres ensayos que habían de cumplir la condición de que la diferencia entre dos cualesquiera de ellos no fuera superior a dos golpes.

Para la realización de los ensayos de penetración se utilizó un cono de duraluminio de 30° de ángulo cónico y 40 g

Suelo nº 1				
w (%)	d ₈₀ (mm)	d ₁₀₀ (mm)	d ₁₅₀ (mm)	N
55.2	19.1	24.2	—	33
59.1	22.4	28.5	—	19
57.4	21.3	27.2	—	20
56.2	20.1	25.7	—	26

TABLA 3. Humedad, penetración y número de golpes (Suelo nº 1).

Suelo nº 2				
w (%)	d ₈₀ (mm)	d ₁₀₀ (mm)	d ₁₅₀ (mm)	N
59.0	19.5	25.2	30.1	31
57.2	17.2	21.8	27.4	>35
64.6	23.7	30.3	—	16
63.0	22.1	28.5	—	18
62.1	20.9	27.1	—	23
61.5	21.2	26.7	—	26
60.4	19.6	25.1	29.8	31

TABLA 4. Humedad, penetración y número de golpes (Suelo nº 2).

de masa, el cual se lastraba hasta conseguir las masas de 80, 130 y 190 g. El procedimiento de ensayo ha sido el siguiente: el suelo que pasa el tamiz 0,40 UNE era amasado con agua destilada, manteniéndose la mezcla en reposo durante 24 horas a fin de conseguir una buena homogeneización. Transcurrido este tiempo de curado, la mezcla era colocada en una cápsula de latón de 47 mm de altura y 75 mm de diámetro, enrasándose su superficie con una espátula. Colocada la cápsula con la mezcla bajo el cono, se aproximaba éste hasta que su punta quedara justo en contacto con la superficie del suelo, liberándose a continuación el cono durante 5±0.5s, leyéndose seguidamente la penetración en un cuadrante graduado en 400 divisiones de 0.1 mm. La penetración para un cono dado se obtenía como media aritmética de tres que cumplieran la condición de que entre cualquiera de ellas no hubiera una diferencia superior a un milímetro. La humedad correspondiente a la penetración se determinaba sobre una porción de la mezcla extraída de la zona afectada por el ensayo.

En las tablas números 3 al 10 se han recogido los resultados de los ensayos de penetración con los conos de 80, 130 y 190 gramos así como el número de golpes que se obtuvo en la cuchara de Casagrande, indicándose asimismo la humedad del suelo ensayado.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. RELACIÓN NÚMERO DE GOLPES-HUMEDAD

La metodología de la norma UNE para la determinación del límite líquido se basa, igual que la norma ASTM, en la linealidad de la relación entre los logaritmos del número de golpes y de la humedad del suelo, en tanto que la variante de la norma BS que trata del empleo de la cuchara de Casagrande supone que la relación lineal se establece entre el logaritmo del número de golpes y la humedad (en escala natural).

Con la humedad en el eje de abscisas, para mantener la presentación clásica de relaciones humedad-consistencia, en las figuras 1 y 2 se muestran los resultados habidos con la cuchara de Casagrande utilizando las dos formas de presentación citadas en el párrafo anterior. La semejanza entre las gráficas es notable y las posibilidades de ajuste de rectas a los puntos correspondientes a cada suelo son muy semejantes. Hay también una gran coincidencia entre los valores de los límites líquidos obtenidos mediante un ajuste de rectas por mínimos cuadrados.

Suelo nº 3				
w (%)	d ₆₀ (mm)	d ₁₃₀ (mm)	d ₂₅₀ (mm)	N
56.8	23.3	29.8	—	15
50.1	18.0	22.5	27.6	>35
48.2	16.0	20.1	24.2	>35
53.9	20.9	26.5	—	22
46.8	15.8	19.7	—	>35
53.7	21.3	27.5	—	19
48.2	15.2	19.9	23.6	>35
47.3	14.3	18.7	22.9	>35
53.4	21.3	26.9	—	18
52.3	20.2	25.5	30.5	26
47.4	15.0	18.7	22.6	>35
45.9	14.7	18.6	22.2	>35
51.9	19.8	25.1	—	24
43.6	12.3	16.1	19.4	>35
43.7	12.6	16.1	19.3	>35
51.8	18.8	24.3	29.4	33
50.6	18.9	24.1	—	34

TABLA 5. Humedad, penetración y número de golpes (Suelo nº 3).

Suelo nº 4				
w (%)	d ₆₀ (mm)	d ₁₃₀ (mm)	d ₂₅₀ (mm)	N
36.9	16.1	21.0	25.2	30
37.0	16.8	20.7	26.5	27
33.1	12.3	16.1	19.1	>35
32.4	12.0	14.9	18.4	>35
31.7	10.6	13.8	16.2	>35
39.5	19.5	24.9	29.9	17
30.6	9.3	12.4	14.9	>35
38.6	18.6	23.1	28.6	21
37.1	17	20.8	25.8	27
35.8	15.1	19.1	22.8	33
40.7	21.0	26.8	—	15
29.6	8.8	11.2	13.6	>35
30.4	10.4	12.8	15.7	>35
31.8	11.1	14.1	16.9	>35
35.7	15.3	20.1	24.1	37

TABLA 6. Humedad, penetración y número de golpes (Suelo nº 4).

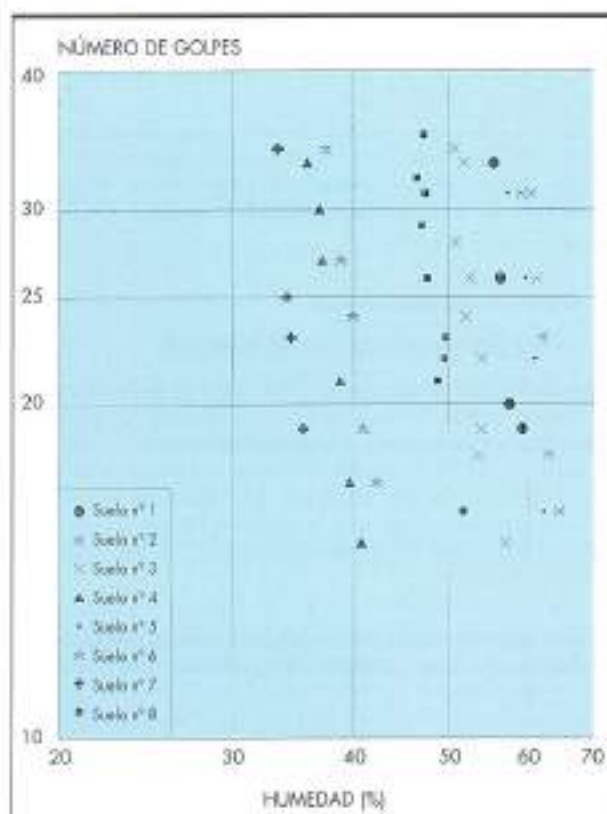


FIGURA 1. Humedad - Número de golpes [UNE-7377/75].

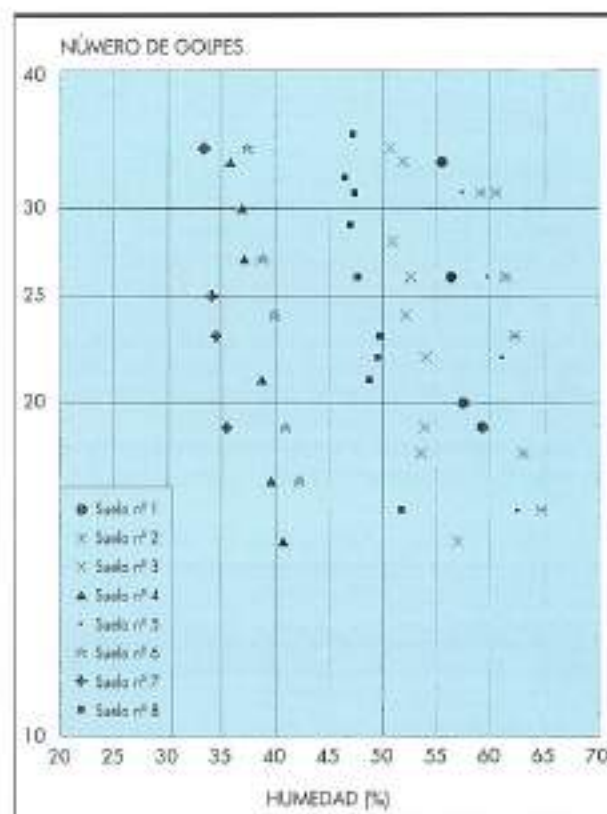


FIGURA 2. Humedad - Número de golpes [UNE-7377/75].

Suelo nº 5				
w (%)	d ₃₀ (mm)	d ₁₅₀ (mm)	d ₇₅ (mm)	N
56.5	17.1	21.2	—	>35
62.2	23.0	29.2	—	16
65.7	25.3	—	—	<15
57.1	16.5	20.5	—	>35
61.0	20.9	26.8	—	22
58.0	17.5	21.8	—	>35
59.6	19.2	24.4	—	26
58.6	18.1	22.8	—	>35
62.5	22.0	27.9	—	20
64.6	24.5	30.8	—	15
63.4	22.5	29.1	—	17
58.2	17.2	21.7	25.6	>35
64.0	22.9	28.2	33.0	20
57.4	17.9	22.8	—	31

TABLA 7. Humedad, penetración y número de golpes [Suelo nº 5].

Suelo nº 7				
w (%)	d ₃₀ (mm)	d ₁₅₀ (mm)	d ₇₅ (mm)	N
38.2	22.1	27.5	—	11
33.3	14.2	17.6	20.6	34
34.5	16.2	21.1	25.5	25
34.9	16.4	21.7	—	23
35.6	19.0	23.6	28.4	19
33.5	14.0	17.0	—	34

TABLA 9. Humedad, penetración y número de golpes [Suelo nº 7].

Con respecto a las pendientes de las rectas ajustadas, en la tabla 11 se refieren los valores correspondientes a cada suelo y método, que no se alejan excesivamente de los previstos por las normas respectivas para sus métodos de determinación con un solo punto. En consecuencia, parece irrelevante la influencia que este aspecto diferente entre los métodos UNE/ASTM y BS pueda tener en la determinación del límite líquido con la cuchara de Casagrande.

4.2. RELACIÓN PENETRACIÓN-HUMEDAD

Utilizando el mismo sistema de situar la humedad en escala natural en el eje de abscisas, se han representado en la figura 3 los puntos correspondientes a las penetraciones del cono de 80 g. Puede verse en ella que los puntos correspondientes a un mismo suelo se alinean también sensiblemente en rectas de pendiente creciente con la humedad. Las rectas se han deducido por ajuste por mínimos cuadrados.

Con respecto a la importancia del peso del cono, se puede contrastar la fórmula (1) comparando los resultados

Suelo nº 6				
w (%)	d ₃₀ (mm)	d ₁₅₀ (mm)	d ₇₅ (mm)	N
42.2	20.0	25.0	30.8	17
36.4	13.5	17.5	20.7	>35
34.6	11.1	14.9	17.5	>35
40.8	17.7	22.6	28.0	19
34.4	10.4	14.3	17.3	>35
36.2	12.8	16.6	20.5	>35
39.9	16.9	—	—	24
38.7	15.9	20.1	25.0	27
34.3	10.8	14.1	16.4	>35
33.1	9.7	12.3	15.0	>35
37.6	14.6	18.9	22.9	34

TABLA 8. Humedad, penetración y número de golpes [Suelo nº 6].

Suelo nº 8				
w (%)	d ₃₀ (mm)	d ₁₅₀ (mm)	d ₇₅ (mm)	N
51.5	18.8	24.8	29.6	16
45.9	14.5	18.2	—	>35
49.4	17.5	21.6	25.6	23
41.6	10.5	13.7	—	>35
40.4	9.8	13.1	15.9	>35
41.8	10.4	14.2	17.1	>35
48.6	16.5	21.8	27.1	21
40.0	10.3	12.6	15.0	>35
49.4	17.4	22.5	26.1	22
43.6	12.2	15.5	18.9	>35
45.9	14.7	17.9	21.7	>35
47.4	16.1	20.0	24.3	31
47.2	14.9	19.1	23.4	31
47.0	14.9	18.8	23.9	35
46.9	13.9	19.5	23.5	29
46.4	14.3	19.0	23.3	32

TABLA 10. Humedad, penetración y número de golpes [Suelo nº 8].

habidos con los distintos conos. Así, en la figura 4, se han representado los puntos correspondientes a todos los casos en que se ha ensayado suelo con la misma humedad bajo distintos conos. De (1) se deduce que la relación de penetraciones ha de ser:

Suelo nº	Pendiente logw-logN
1	-8,269
2	-8,539
3	-6,918
4	-6,529
5	-7,516
6	-6,002
7	-8,109
8	-6,696

TABLA 11. Relación de pendientes. Recta humedad-número de golpes.

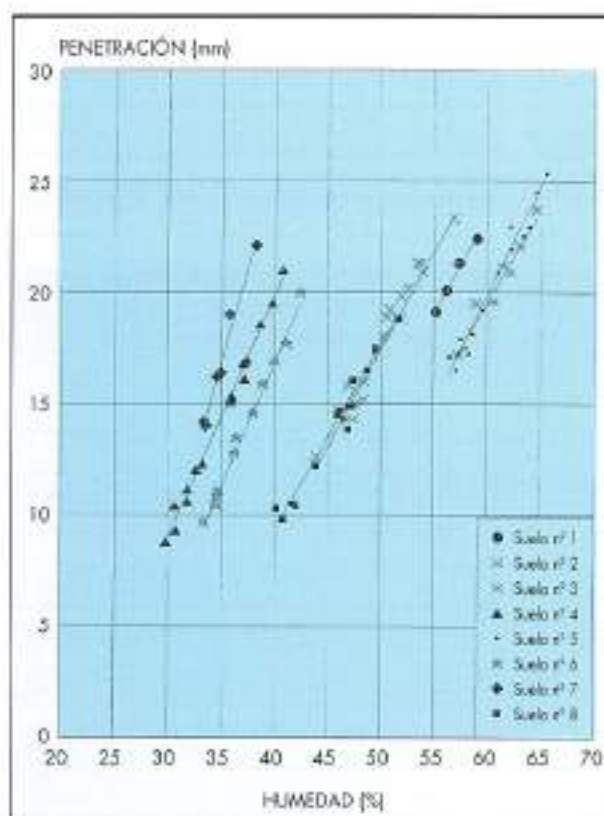


FIGURA 3. Relación humedad-penetración. Cono de 30° y 80 g.

$$d_{120}/d_{80} = 1.275 \quad d_{190}/d_{80} = 1.54$$

valores a los que corresponden las rectas de la figura 4, a las que se ajustan con razonable precisión los puntos de los distintos pares de ensayos.

4.3. ESTIMACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO

En la figura 5 se han representado los resultados de los ensayos de penetración realizados en los ocho suelos estudiados. Sobre la recta de ajuste de cada suelo se ha situado el límite líquido obtenido con la cuchara de Casagrande, según el método señalado por la norma UNE. A partir de estos

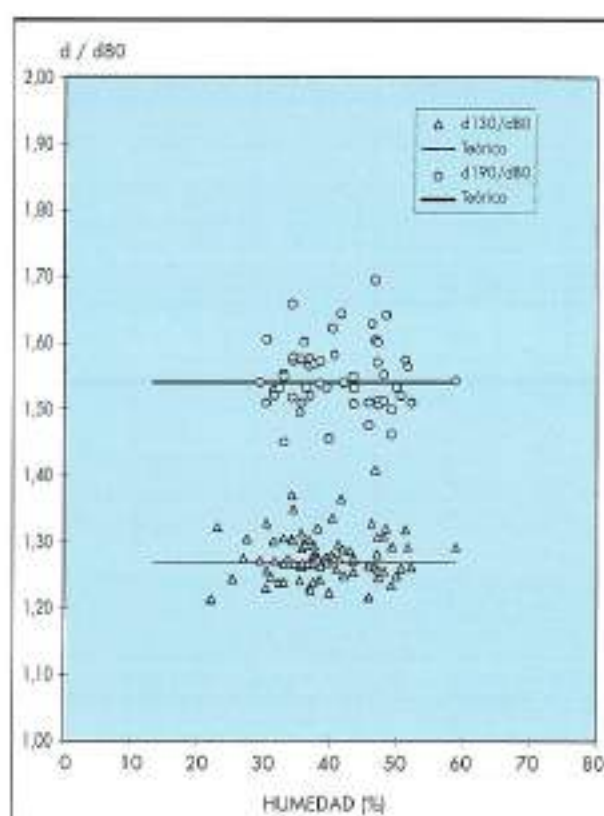


FIGURA 4. Relación de penetraciones. Conos de 30°, 80 g, 130 g y 190 g.

puntos se ha obtenido la recta de regresión (de la penetración que corresponde al estado de límite líquido frente al valor de la humedad del límite líquido) que constituye el ajuste de los autores.

En la figura 5 se han representado también la recta de ajuste de Sherwood y Ryley (1970) así como la de Tumay y Yilmaz (1980). La primera se diferencia de la segunda en que la determinación del límite líquido se realiza con la cuchara BS, cuya base tiene, como se sabe, una dureza inferior a la de la cuchara ASTM. Esta circunstancia explica la proximidad existente entre la recta obtenida por Tumay y Yilmaz y la propuesta por los autores, basadas en la utilización de la cuchara ASTM, y el alejamiento entre éstas y la recta de Sherwood y Ryley.

La intersección de las rectas de ajuste con la de humedad-penetración de cada uno de los suelos proporciona el límite líquido para los métodos basados en el empleo de una recta de calibración.

En la figura 5 se ha dibujado también la recta horizontal correspondiente a la penetración de 20 mm, cuya intersección con la recta de ajuste del ensayo humedad-penetración de un suelo proporciona el límite líquido según norma BS.

La comparación del límite líquido según la norma BS y mediante la utilización de la recta de ajuste o calibración de Sherwood y Ryley con el límite líquido deducido según la norma UNE se ha efectuado en la figura 6, obteniéndose, en el primer caso, la recta de ecuación:

$$(LL)_{BS} = 8.05 + 0.87 \cdot (LL)_{UNE} \quad [3]$$

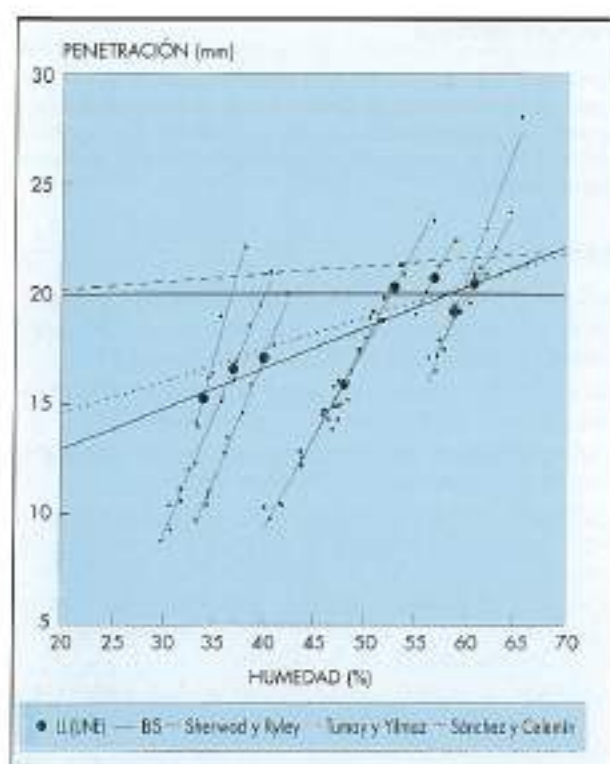


FIGURA 5. Determinación del límite líquido: comparación de métodos (I). Turay y Yilmaz, Sánchez y Celemín: recta de calibración con (80 g, 30°), cucharas ASTM Sherwood y Ryley; recta de calibración con (80 g, 30°), cucharas BS.

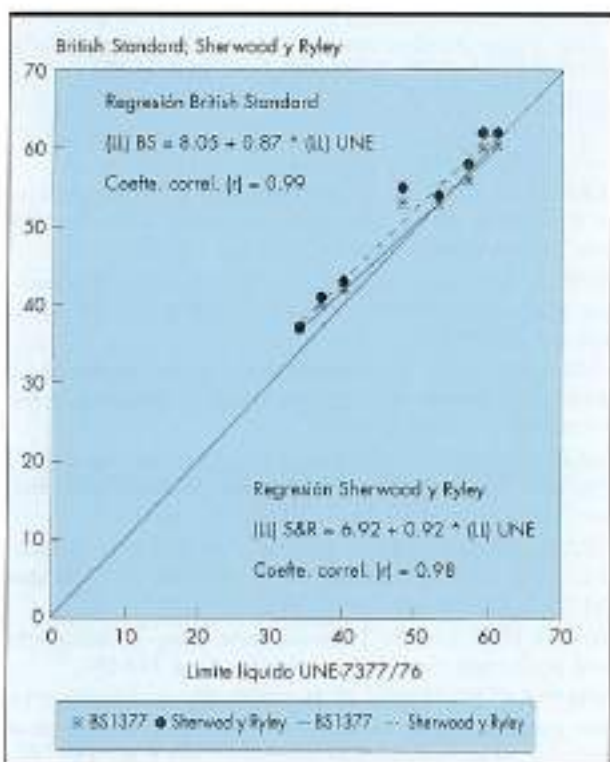


FIGURA 6. Determinación del límite líquido: comparación de métodos (II). Sherwood y Ryley (1970): recta de calibración con (80 g, 30°) cucharas BS British Standard 1377/90; penetración 20 mm, cono (80 g, 30°).

y en el segundo,

$$(LL)_{SR} = 6.92 + 0.92 \cdot (LL)_{UNE} \quad [4]$$

Como era de esperar, el límite líquido obtenido mediante la recta de Sherwood y Ryley es superior al límite UNE, debido al efecto de la dureza de la base de esta última cuchara.

En la figura 7 se ha representado el límite líquido deducido de la aplicación de la recta de ajuste de los autores y de la de Turay y Yilmaz contra el límite líquido UNE. La ecuación de la recta de ajuste en el primero de los casos ha sido:

$$(LL)_{TY} = 2.15 + 0.97 \cdot (LL)_{UNE} \quad [5]$$

Al comparar el límite líquido obtenido mediante la recta de calibración de los autores con el límite líquido resultante de la aplicación de la norma UNE, se obtuvo la recta:

$$(LL) = -0.45 + (LL)_{UNE} \quad [6]$$

Si como viene siendo habitual, el límite líquido se redondea a las unidades, la recta de regresión obtenida por los autores para los suelos ensayados predeciría la coincidencia entre el límite líquido obtenido mediante la observancia de la norma UNE y el resultante de la aplicación de la recta de calibración presentada en este trabajo (Fig. 5).

Son conocidos los inconvenientes operativos del método de determinación del límite líquido basado en el empleo de la cuchara de Casagrande. Se sabe también que este método es un ensayo dinámico de resistencia al corte y que existen suelos de grano fino que presentan sensibilidad a los esfuerzos dinámicos (Casagrande, 1958). Si la realización de posteriores estudios confirmara la tendencia apuntada por la ecuación de los autores, podría darse un paso importante en

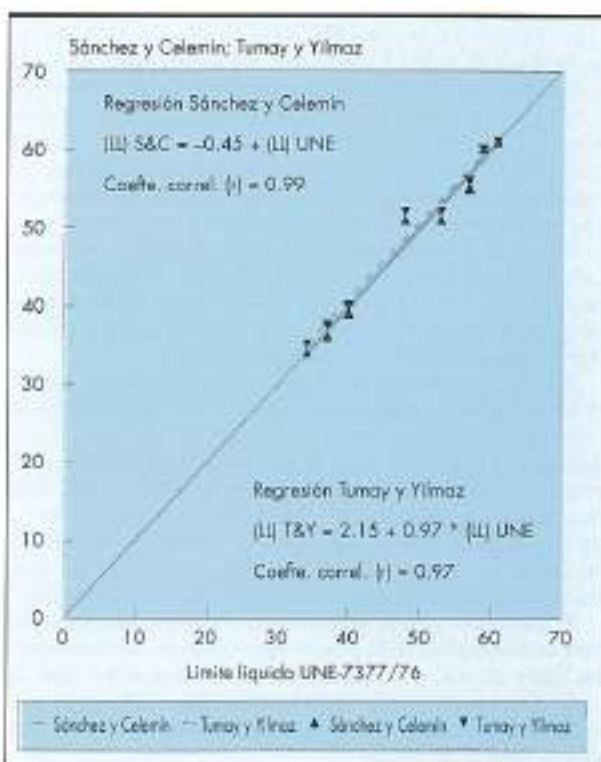


FIGURA 7. Determinación del límite líquido: comparación de métodos (III). Turay y Yilmaz (1970): recta de calibración con (80 g, 30°) cucharas ASTM Sánchez y Celemín (1996): recta de calibración con (80 g, 30°) cucharas ASTM.

orden a seguir la sugerencia apuntada por Casagrande, al ser posible la sustitución del ensayo dinámico basado en la cuchara por otro de penetración estática que además de corregir el inconveniente apuntado por Casagrande, permitiría aprovechar la abundante experiencia que se ha ido acumulando con el empleo de la cuchara.

5. CONCLUSIONES

Se han realizado ensayos de penetración con conos de 30° de ángulo cónico y diferentes masas, incluyendo el valor estandarizado de 80g. Dichos ensayos se han efectuado sobre ocho suelos procedentes de diversas provincias españolas. La campaña experimental comprendió también ensayos de identificación y de resistencia al corte sin drenaje, siendo ésta la primera publicación de resultados.

Los resultados obtenidos en la presente campaña son suficientemente consistentes entre sí a juzgar por la calidad de los ajustes obtenidos y la comparación de éstos con los publicados por otros autores.

De la revisión bibliográfica efectuada cabe concluir que desde el punto de vista de la normalización del ensayo para la determinación del límite líquido, los procedimientos de determinación del límite líquido mediante el cono de caída libre pueden reducirse a dos: uno de tipo determinista, en el que el límite líquido es la humedad del suelo cuando se obtiene una penetración de 20 mm con un cono de 80 g de masa y 30° de ángulo cónico y el basado en la utilización de una recta de calibración, en el que el límite líquido de un suelo se obtiene como intersección de la recta humedad-penetración del suelo con dicha recta de calibración.

En este trabajo se ha aplicado ambos procedimientos a los suelos ensayados. Los resultados alcanzados aconsejan proponer el segundo, es decir, el que está basado en la utilización de una recta de calibración. Esta recta es la de regresión lineal de la penetración correspondiente al límite líquido obtenido según Casagrande con la humedad. Una vez definida esta recta, el límite líquido de un suelo sería la humedad correspondiente al punto de intersección con la obtenida en el ensayo de penetración del suelo correspondiente. La recta obtenida por los autores para suelos españoles puede verse en la figura 5 junto a las que han sido propuestas para en otros estudios para suelos de otros países.

Dado que la determinación del límite líquido se ha venido haciendo mediante el empleo de la cuchara de Casagrande, cualquier sustitución de dicho procedimiento debería pasar por permitir el aprovechamiento de la abundante y valiosa experiencia acumulada obtenida con aquél.

Este trabajo evidencia de que tal sustitución es posible en las condiciones antes apuntadas. Si el límite líquido se expresa sin cifras decimales, su estimación mediante la metodología basada en la recta de calibración coincidiría con la resultante del método establecido por la norma UNE. Adicionalmente, se obtendría la práctica desaparición de los inconvenientes operativos asociados al empleo de la cuchara así como los que eventualmente plantearían los suelos de grano fino sensibles a la aplicación de esfuerzos dinámicos.

El presente trabajo proporciona evidencia experimental para la sustitución de la metodología UNE de determinación del límite líquido por otra basada en el empleo del cono de caída libre asociada a la recta de calibración deducida a partir de la realización del ensayo de penetración sobre una amplia familia de suelos.

AGRADECIMIENTOS

Parte de la campaña de ensayos ha sido realizada por el personal del Laboratorio de Geotecnia de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria, al que se agradece la colaboración prestada.

REFERENCIAS

- BELVISO, R.; CIAMPOLI, S., COTECCHIA, V. and FEDERICO, A. (1985). Use of the cone penetrometer to determine consistency limits. *Ground Engineering* 18(5), pp. 21-22.
- BS 1377 (1990). Methods of testing of soils for civil engineering purposes. London: British Standards Institution.
- CASAGRANDE, A. (1958). Notes on the design of the liquid limit device. *Geotechnique* 8, No. 2, pp. 84-91.
- GARNEAU, R. and LeBIHAN, J. P. (1977). Estimation of some properties of Champlain clays with the Swedish fall cone. *Canadian Geotechnical Journal* 14, No. 4, pp. 571-581.
- HARISON, J. A. (1988). Technical note. Using the BS cone penetrometer for the determination of the plastic limit of soils. *Geotechnique* 38, No. 3, 433-438.
- HARISON, J. A. (1990). Author's reply to discussions on Harison, J.A. (1988, *Geotechnique* 38, No. 3, 433-438). *Geotechnique* 40, No. 2, pp. 311-315.
- HOULSBY, G. T. (1982). Theoretical analysis of the fall cone test. *Geotechnique* 32, No. 2, pp. 111-118.
- NORMAN, L. E. J. (1958). A comparison of values of liquid limit determined with apparatus having different hardness. *Geotechnique* 8, No. 2, pp. 79-84.
- SHERWOOD, P. T. and RYLEY, M. D. (1970). An investigation of a cone penetrometer method for the determination of the liquid limit. *Geotechnique* 20, No. 2, pp. 203-208.
- SKEMPTON, A. W. (1985). A history of soil properties, 1717-1927. *Proc. 11th Conf. Soil Mech. and Found. Eng. Golden Jubilee Volume*, pp. 95-121.
- SKOPEK, J. and TER-STEPANIAN, G. (1975). Comparison of liquid limit values determined according to Casagrande and Vasilev. *Geotechnique* 25, No. 1, pp. 135-138.
- TUMAY, M. T. and YILMAZ, R. (1980). Factorial Comparison of liquid limit determination by ASTM apparatus versus fall-cone penetration.
- UNE 7.377 (1975). Determinación del límite líquido de un suelo por el método de la cuchara. Instituto Nacional de Racionalización y Normalización.
- WASTI, Y. (1987). Liquid and plastic limits as determined from the fall cone and the Casagrande methods. *Geotechnical Testing Journal* 10, No. 1, March 1987, pp. 26-30.
- WIJEYAKULASURIYA, C. V. (1990). Discussion on Harison, J.A. (1988, *Geotechnique* 38, No. 3, 433-438). *Geotechnique* 40, No. 2, pp. 311-315.
- WOOD, D. M. (1982). Technical note. Cone penetrometer and liquid limit. *Geotechnique* 32, No. 2, pp. 152-157.
- WROTH, C. P. y WOOD, D. M. (1978). The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils. *Canadian Geotechnical Journal* 15, No. 2, pp. 137-145.

CALIDAD DE OBRA



ARRIBA:
NUEVA ALINEACIÓN del MUELLE de
SANTA LUCÍA. CARTAGENA, MURCIA.

DEBAJO:
PRESA RAMBLA del BOQUERÓN.
ALBACETE.



CANAL de TRASVASE MULLIDAR-BOQUERÓN.
HELLÍN, ALBACETE.



SGS

SGS Tecnos, S.A.

División de Construcción Civil

"Control de calidad y servicio técnico, en obras civiles y de edificación en todas sus fases"



**Asistencia técnica
en edificación.**



**Asistencia técnica
en obras civiles.**



**Estudios geológicos
y geotécnicos.**



**Laboratorio acreditado
de materiales y
mecánica del suelo.**



Maquinaria de sondeo especializada en geotecnia.



Línea AVE Madrid-Zaragoza,
tramo Calatayud-Ricla. Control de ejecución
del paraguas con micropilotes en la boca
norte del túnel "Saviñán".



Línea AVE Zaragoza-Lérida. Entronque túnel
"Las Hechiceras", lado Zaragoza.