CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

A continuación se describe el material empleado en los ensayos, así como la metodología adoptada en la determinación de los límites líquidos de los tres suelos descritos en el capítulo anterior.

Hay que recordar la importancia de incorporar al procedimiento de ensayo las medidas necesarias, especificadas en el primer capítulo, para evitar la influencia en los resultados de factores como el tipo de acanalador utilizado, el secado del suelo, la cantidad de muestra ensayada, el tempering, el sentido de humectación o la sensibilidad del operador, el cual interviene en el amasado de la muestra, llenado de la cuchara y toma de humedad.

3.1. Equipo empleado

En referencia al equipo de laboratorio empleado, se dispone de:

- **Cuchara de Casagrande.** Se trata de un utensilio mecánico cuyas dimensiones y composición están normalizadas, especificadas en la norma UNE 103-103-94 [3].

  En la Fig.25 se muestra un croquis con las características y dimensiones que debe tener dicho aparato y en la Fig.26 se muestra la cuchara utilizada durante los ensayos.

Medidas

Letra	A Δ	B Δ	C Δ	E Δ	F	G	H	J Δ	K Δ	L Δ	M Δ	X
MM	54 ±0,5	2 ±0,1	27 ±0,5	56 ±2,0	28	10	28	60 ±1,0	50 ±2,0	150 ±2,0	125 ±2,0	19
Letra	**N**	**P**	**R**	**T**	**U Δ**	**V**	**W**	**Z**	**D**	**S_1**	**S_2**	**Y**
MM	17	28	21	45	47 ±1,0	4	13	6,5	23	75° ±1°	60° ±1°	12,7

Δ Medidas esenciales

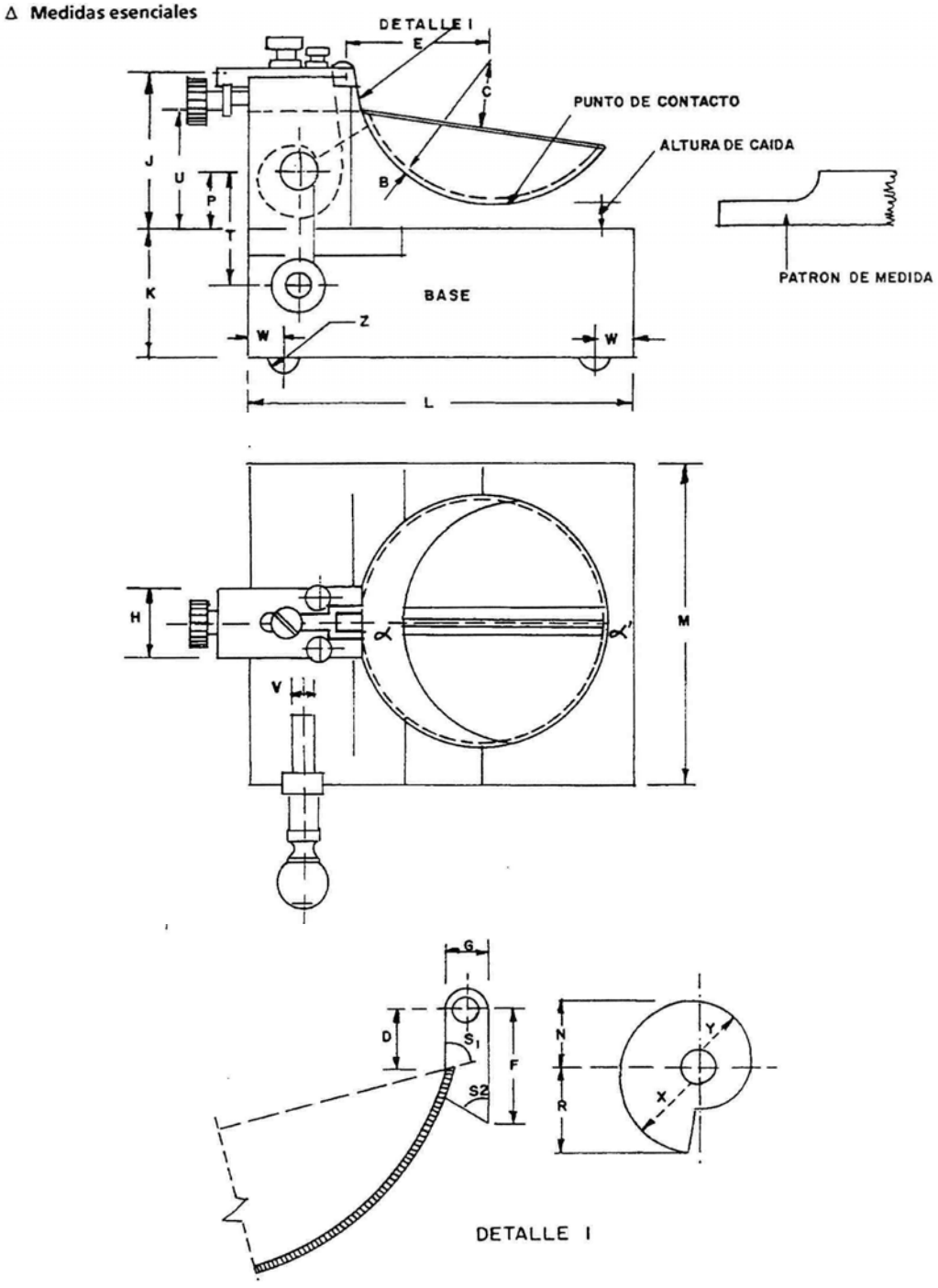

Fig.25. Dimensiones del Aparato de Casagrande

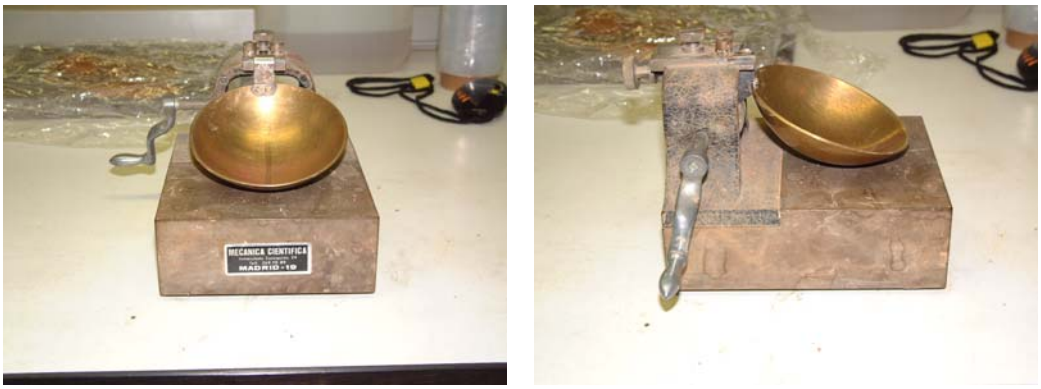

Fig.26. Cuchara de Casagrande utilizada en los ensayos

- **Acanalador.** El acanalador utilizado en los ensayos es el acanalador de Casagrande, el cual, de igual modo que la cuchara de Casagrande, debe tener unas dimensiones y características específicas, UNE 103-103-94. (ver Fig.27 y Fig.28)

Medidas

Letra	A Δ	B Δ	C Δ	D Δ	E Δ	F	G	H Δ
MM	2 ±0,1	11 ±0,2	40 ±0,5	8 ±0,1	50 ±0,5	5	55	47° ±1°
Letra	**J Δ**	**K Δ**	**L Δ**	**M Δ**	**N Δ**	**P**	**R**	
MM	10 ±0,05	20 ±0,1	60° ±1°	1,6 ±0,1	3,2 ±0,1	1,6 ±0,1	10	

Δ Medidas esenciales

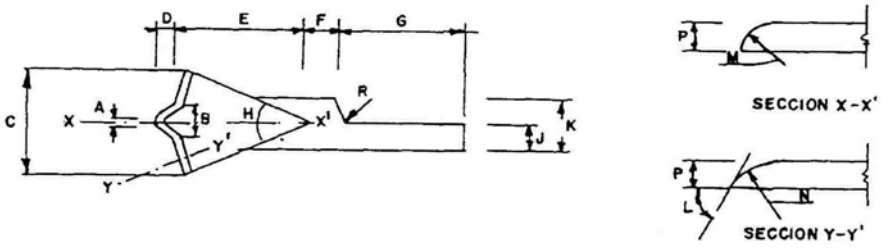

Fig.27. Dimensiones del acanalador de Casagrande

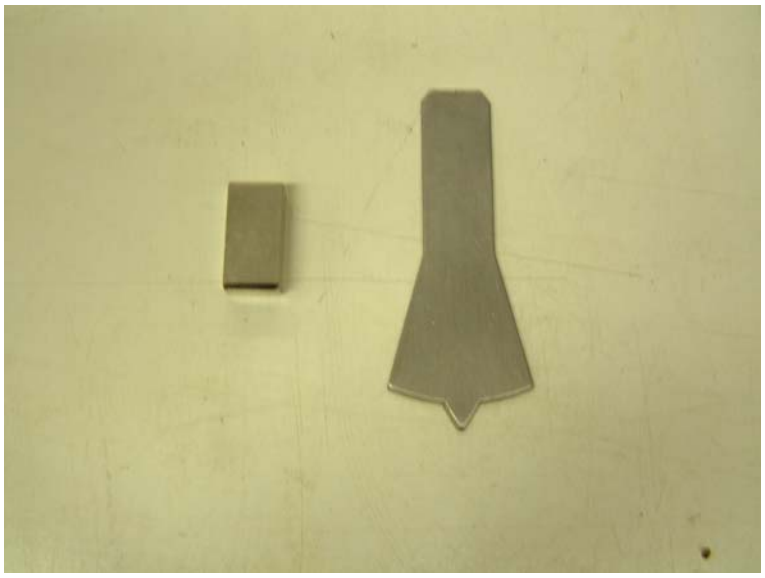

Fig.28. Acanalador de Casagrande

- **Espátula.**
- **Placa de mármol.** Para amasar el suelo.
- **Balanza con precisión de ±0,01 g.**
- **Tamiz 400 µm.** Norma UNE 7-050 /2 correspondiente a tamices de ensayo.

Fig.29. Tamiz nº 40.

- **Horno para controlar la temperatura de la muestra.**
- **Frigorífico.** Necesario para alcanzar temperaturas por debajo de los 20 ºC.
- **Termopar y sonda.** Para conocer con precisión la temperatura de la muestra en todo momento.
- **Horno para secado regulable hasta 115 ºC.**

- **Mortero y mazo de goma.**

Fig.30. Mortero y mazo de goma

- **Guantes para manejar los recipientes calientes y agua destilada.**

3.2. Calibrado de los equipos

Una vez se dispone del equipo necesario y previamente a realizar los ensayos, se debe comprobar el buen estado de todos los elementos que van a emplearse.

La **cuchara de Casagrande** debe estar limpia y en buen funcionamiento. La zona de la base en la que golpea la cuchara no debe presentar una huella con un diámetro superior a 10 mm, y debe estar firmemente enganchada al soporte de sujeción. Debiéndose sustituir cuando el acanalador hubiera formado huella de más de 0,1 mm. El pivote del gancho de suspensión no debe estar desgastado hasta tal punto que permita un movimiento lateral de más de 3,0 mm en el punto más bajo y si la cuchara cae antes de que el gancho de suspensión pierda el contacto con la leva, ésta se deberá sustituir.

El **acanalador de Casagrande** se debe verificar frecuente y regularmente con el objetivo de verificar su desgaste, ya que dependiendo del tipo de suelos pueden sufrir un mayor desgaste. Cuando no se cumplan las dimensiones especificadas anteriormente dicho acanalador se desechará.

La **altura de caída de la cuchara** debe ajustarse de forma que el punto de contacto con la base, fácilmente localizable a simple vista en la cuchara por formarse una mancha más brillante a causa de los golpes, caiga desde una altura de

10 mm ± 0,05 mm. Normalmente dicha comprobación se realiza mediante un patrón que suelen llevar los acanaladores en la parte posterior, tal y como puede observarse en el croquis de la Fig.27. No obstante, el acanalador empleado no constaba de dicho patrón, por lo que se recurrió a una pieza metálica cuyas dimensiones eran las necesarias, a modo de patrón (ver Fig.28).

3.3. Control de la temperatura

El elemento a tener en cuenta en la realización del presente estudio es, obviamente, la temperatura. A continuación, se describe la problemática que surge de ensayar los suelos a determinadas temperaturas.

En cuanto al equipo de laboratorio empleado para controlar la temperatura, se dispuso, en primer lugar, de un horno con temperatura regulable hasta los 100 ºC (ver Fig.31) y de un frigorífico.

Fig.31. Horno empleado para controlar la temperatura del suelo a ensayar

En segundo lugar, con el objetivo de poder conocer de forma precisa la temperatura del suelo en el momento de realizar el ensayo se dispuso un termopar y una sonda como los mostrados en la Figura 32.

Así pues, se hacía llegar el suelo a ensayar hasta la temperatura deseada, usando el horno o el frigorífico según conviniera, y posteriormente se obtenía el límite líquido.

No obstante, se presentaba un grave problema. Al sacar la muestra del horno y extenderla en la cuchara de Casagrande para posteriormente hacer el surco con el acanalador de Casagrande y hacer girar la manivela, se producía un descenso de la temperatura no deseado (o aumento si se había sometido la muestra a enfriamiento). Ya que dichas operaciones de preparación suponían varios minutos.

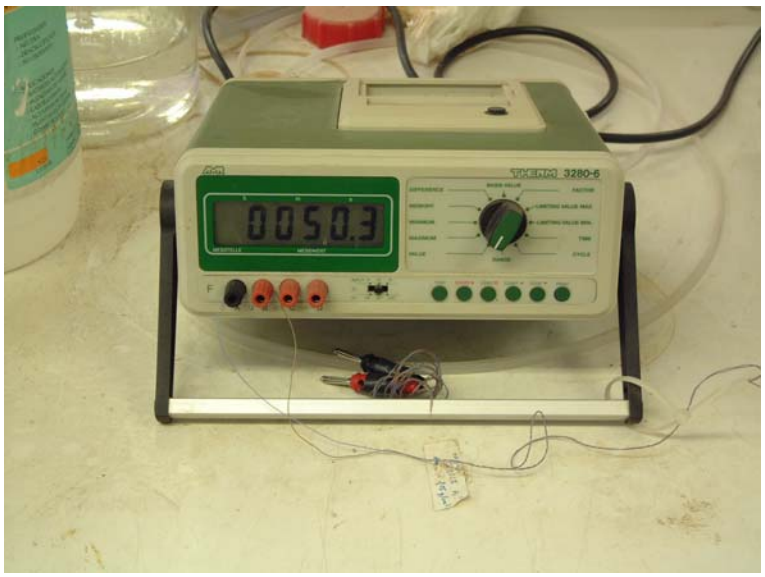

Fig.32. Termopar y sonda

Para agilizar el proceso de preparación se optó finalmente por introducir la muestra de suelo en el horno ya preparada, es decir, se extendió correctamente el suelo a ensayar en la cuchara de Casagrande y se introdujo el conjunto en el horno. Se colocó el extremo de la sonda cuidadosamente en el interior de la muestra pero alejada de la zona en la que posteriormente (tras alcanzar la temperatura deseada) se tendría que realizar el surco con el acanalador (ver Fig.33).

Con todo esto, se reducía el tiempo que transcurría desde la extracción de la muestra del horno hasta obtener la porción de suelo próximo a las paredes del surco donde se cierra. Con lo que el descenso de temperatura (o aumento) observado no era tan acentuado como anteriormente.

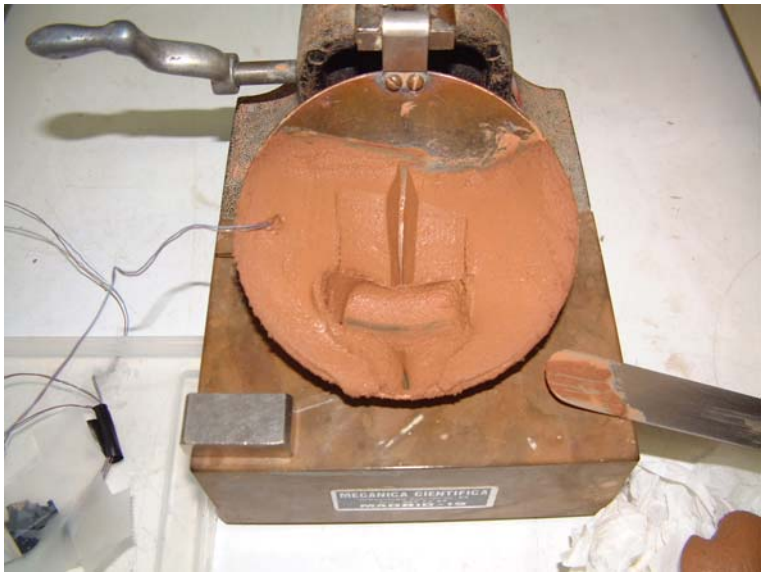

Fig.33. Sonda introducida en el interior del suelo

Otra operación llevada a cabo con el mismo objetivo de evitar un descenso pronunciado de la temperatura, fue la de introducir en el horno el aparato donde se coloca la cuchara durante algunos minutos. Con esto se pretendía que al incorporar la cuchara en el soporte no se produjera un intercambio de calor, que pudiera disminuir la temperatura del suelo, ya que la cuchara se encontraba a una mayor temperatura que el aparato. Se procedió de forma análoga en el enfriamiento de los suelos.

Otro problema observado a raíz de los primeros ensayos, era la pérdida de humedad experimentada por el suelo en el interior del horno. Como los suelos empleados eran ampliamente conocidos por el departamento, a la hora de preparar las muestras, para posteriormente dejarlas 24 horas para que se homogeneizara la humedad, la cantidad de agua a añadir al material machacado y tamizado podía conocerse de forma aproximada.

No obstante, si el suelo perdía humedad en el interior del horno, mientras alcanzaba la temperatura de ensayo, a la hora de realizar el ensayo podíamos encontrarnos con un número de golpes superior a 35. Lo cual no era válido porque previamente se optó por dar como buenos tan solo aquellos ensayos con un número de golpes comprendidos entre 15 y 35, tal como se especifica en la norma UNE 103-103-94.

Así pues, se planteó acotar dicha pérdida de humedad y compensarla, con el objetivo de evitar ensayos no válidos, lo cual suponía un coste traducible en pérdida de tiempo y esfuerzo. Para limitar esta pérdida se optó por usar un recipiente lo más hermético posible y que se ajustara en la medida de lo posible al tamaño de la cuchara de Casagrande.

De esta forma, se introducía en su interior la cuchara con el suelo extendido tal y como especifica la norma UNE 103-103-94 y posteriormente se sellaba la tapa con silicona (ver Fig.34).

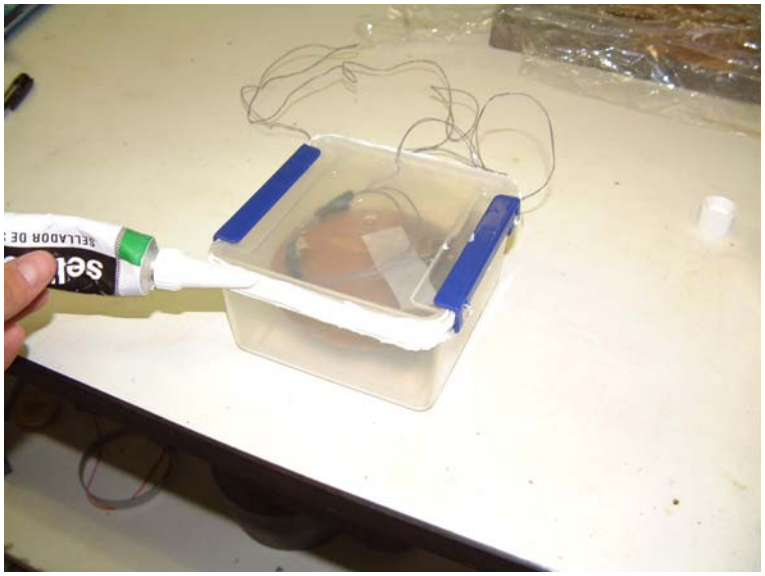

Fig.34. Sellado del recipiente. Limitación de la pérdida de humedad

Se hizo pasar la sonda a través de la tapa superior del recipiente y se selló el hueco entre los cables para evitar posibles fugas.

Se realizaron pruebas para determinar la humedad que se perdía con el dispositivo descrito. La primera prueba consistió en dejar el recipiente sellado a temperatura ambiente (aproximadamente 23 ºC) durante 8 horas, en cuyo interior se había colocado un frasco de cristal con una porción de suelo. En la segunda prueba el recipiente estuvo sometido a una temperatura de 50,1 ºC durante 12 horas.

Se pesaron los recipientes al inicio y transcurridas las 8 horas y 12 horas respectivamente, y posteriormente se introdujo en el horno de desecación (110 ºC) el frasco de cristal con la muestra de suelo (ambas pruebas se hicieron con suelo del Campus Nord). Transcurridas 24 horas en el horno se pesó el frasco y su contenido.

Con los datos obtenidos se pudo calcular la humedad inicial y final en cada proceso y por tanto la posible pérdida de humedad que se producía (ver Tabla 7):

Tara número	8M
Tara + Suelo + Agua	40,69 g
Tara	19,78 g
Recipiente + Sonda	63,10 g
Recipiente + Sonda + Tara + Suelo + Agua	106,87 g

Tabla 7. Datos iniciales

A las 8 horas y a temperatura ambiente se obtuvo un peso de:

Recipiente + Sonda + Tara + Suelo + Agua	106,73 g

A continuación se introdujo el conjunto en el horno a una temperatura de 50,1 ºC, obteniendo a las 12 horas:

Recipiente + Sonda + Tara + Suelo + Agua	106,30 g

A las 24 horas de introducir el frasco en el horno de desecación se obtuvo el último dato que hacía falta:

Tara + Suelo	33,43 g

Así pues se obtuvieron las siguientes pérdidas de humedad:

- Temperatura ambiente ≈ 23 ºC

$$w_i = \frac{A_i}{S_i} \cdot 100 = \frac{40{,}69 - 33{,}43}{33{,}43 - 19{,}78} \cdot 100 \approx 53{,}2\% \quad (9)$$

$$w_f = \frac{A_i - \Delta A}{S_i} \cdot 100 = \frac{(40{,}69 - 33{,}43) - (106{,}87 - 106{,}73)}{33{,}43 - 19{,}78} \cdot 100 \approx 52{,}2\% \quad (10)$$

$$\boxed{Pérdida_{humedad} = w_i - w_f \approx 1\%} \quad (11)$$

- Temperatura 50,1 ºC

$$w_i = \frac{(40{,}69 - 33{,}43) - (106{,}87 - 106{,}73)}{33{,}43 - 19{,}78} \cdot 100 \approx 52{,}2\% \qquad (12)$$

$$w_f = \frac{[(40{,}69 - 33{,}43) - (106{,}87 - 106{,}73)] - (106{,}73 - 106{,}30)}{33{,}43 - 19{,}78} \cdot 100 \approx 49\% \quad (13)$$

$$\boxed{Pérdida_{humedad} = w_i - w_f \approx 3{,}2\%} \qquad (14)$$

Finalmente, se obtuvo la pérdida de humedad que se producía hasta alcanzar la temperatura deseada en cada ensayo.

Dicha pérdida sería siempre inferior al 3,2% calculado ya que, en ninguno de los casos se pretendían alcanzar los 50 ºC (40 ºC aproximadamente), ni el recipiente permanecería 12 horas en el interior del horno. Puesto que las temperaturas que se querían obtener se alcanzaban mucho antes, tratándose aproximadamente de 1 hora en el peor de los casos.

Con todas estas consideraciones se debía tener especial cuidado en el momento de retirar el recipiente del horno, previamente a determinar los límites líquidos. Ya que factores externos podrían alterar la temperatura, como corrientes de aire que la podrían hacer disminuir repentinamente o al manipular la cuchara de Casagrande. En dicha operación se debía evitar que la sonda saliera de la muestra, ya que la temperatura marcada en el lector digital caía bruscamente y ya no se volvía a retomar la temperatura inicial, dando invalidez al ensayo realizado.

3.4. Procedimiento de ensayo

Una vez descrita la problemática derivada del control de la temperatura en los suelos objeto de ensayo, se procede a describir el procedimiento seguido para la determinación del límite líquido mediante la utilización del aparato de Casagrande.

En la metodología empleada se han adoptado todas las medidas necesarias para evitar la influencia de aquellos factores, detallados en el primer capítulo, que pudieran dar lugar a resultados erróneos.

Hay que recordar que el límite líquido de un suelo se define como la humedad que tiene un suelo amasado con agua y colocado en una cuchara normalizada, cuando un surco, realizado mediante un acanalador normalizado, que divide dicho suelo en dos mitades, se cierra a lo largo del fondo en una distancia de 13 mm, tras haber dejado caer 25 veces la mencionada cuchara desde una altura de 10 mm sobre una base también normalizada, con una cadencia de 2 golpes por segundo.

Para la determinación del límite líquido se tuvo en cuenta la siguiente secuencia:

- Se utilizó el suelo en estado natural tamizado por el tamiz Nº40 de la serie ASTM
- Control de la temperatura.
- Se utilizó el acanalador de Casagrande para todos los ensayos.
- La cuchara de Casagrande.
- Método de un punto y extrapolación en el ábaco correspondiente.

Para la obtención de los límites líquidos de los diferentes suelos objeto del estudio se siguió, en la medida de lo posible, las normas UNE 103-103-94 [3] y UNE 103-300-93 [15] (ver anejo 2). No obstante, el estudio incorpora el elemento temperatura, el cual no está contemplado en dicha norma y que añade mayor dificultad al proceso.

En primer lugar, los suelos obtenidos en campo se disgregaron mediante un mazo con el extremo de goma. El suelo disgregado se pasó por el tamiz nº 40, con el objetivo de homogeneizar el suelo, y se utilizó para el ensayo la porción de suelo que pasaba por dicho tamiz. Se colocó la muestra de suelo tamizada sobre la placa de mármol y se le incorporó agua, amasando la misma hasta obtener una pasta fluida exenta de grumos, cuya humedad se procuraba que fuera superior a la del límite líquido. El agua utilizada para el amasado de la muestra era agua destilada, ya que de lo contrario se podrían introducir en el suelo componentes desconocidos que variaran su estado natural. Posteriormente se dejó que las muestras de suelo amasadas permanecieran un tiempo mínimo de 24 horas en cámara húmeda para que se homogeneizara la humedad, cumpliendo con las exigencias mínimas de tiempo de maceración.

Luego, en el momento de ensayo, se amasaron nuevamente las muestras para uniformizar su consistencia. Se colocó una porción de muestra húmeda en la cuchara de Casagrande moldeándola contra la misma con la ayuda de la espátula y procurando formar una superficie lisa y que el material tuviera una altura de unos 10 mm en su punto de mayor espesor. Se tuvo especial cuidado que no quedaran huecos de aire dentro del suelo amasado, de forma que si se apreciaba su aparición se repetía el proceso.

El aparato de Casagrande se calibró de manera que la cuchara que golpea sobre la base tuviera una altura de caída de 10 mm. Esto se realiza con los tornillos calibradores con los que cuenta el aparato y con la ayuda de un patrón.

A continuación, se introdujo la cuchara en el interior de un recipiente sellado con silicona para evitar una mayor pérdida de humedad (ver Fig.34). Se colocó el extremo de la sonda cuidadosamente en el interior de la muestra pero alejada de la zona en la que posteriormente se tendría que realizar el surco con el acanalador y se hizo pasar la sonda a través de la tapa superior del recipiente. Se introdujo todo el conjunto

en el horno de la Fig.31 (o frigorífico, si la temperatura de ensayo era inferior a los 23 ºC) hasta alcanzar la temperatura deseada de ensayo, y también el aparato de soporte de la cuchara durante algunos minutos.

Una vez alcanzada la temperatura correcta se extrajo el conjunto del horno con cuidado y nos situamos en una zona aislada de corrientes de aire que pudieran influir en la temperatura del suelo. Al extraer la cuchara de Casagrande del recipiente se evitó que la sonda saliera de la muestra, ya que la temperatura marcada en el lector digital descendería y ya no se volvería a retomar la temperatura inicial, dando invalidez al ensayo realizado.

Luego, sujetando firmemente la cuchara con la palma de la mano, se le practicó una ranura convencional a la muestra de suelo de modo tal que la ranura coincidiera con el eje del aparato de Casagrande y dividiendo a la muestra en dos partes simétricas. La ranura se hizo en sentido de arriba hacia abajo, con el borde biselado hacia delante y manteniendo el acanalador normal a la superficie de la cuchara. Inmediatamente después se colocó la cuchara en el aparato y se hizo girar la manivela del aparato a razón de dos vueltas por segundo y se contaron los golpes necesarios para que los dos bordes de la muestra se unieran en el fondo de la ranura en una longitud de 13 mm.

Si el número de golpes estaba comprendido entre 15 y 35, ambos inclusive, se consideró la determinación como válida. Entonces, se tomó una porción del sector donde se unieron los bordes con la espátula y se colocó en un pesafiltros. Cada conjunto de pesafiltro y muestra se pesó en la balanza para obtener el peso de la porción de suelo húmedo. Se colocó el pesafiltro con la muestra en la estufa y se secó hasta peso constante para obtener el peso de la porción de suelo seco. En este caso, se dejaban las muestras durante un período de 24 horas, cumpliendo con la norma UNE 103-300-93 (ver anejo 2), en la que se consideran suficientes unas 18 horas para cualquier tipo de suelos. Con los pesos de las muestras seca y húmeda se obtuvo el porcentaje de humedad según dicha norma.

En el caso que el número de golpes fuera inferior a 15 y, por tanto, se tuviera la necesidad de aumentar el número de golpes, se debía disminuir el contenido de humedad. Esto se conseguía extendiendo el material para que se evaporara o amasando con suelo que tuviera menos contenido de agua, pero que hubiera sufrido el mismo proceso de amasado que la muestra ensayada. Nunca se añadió suelo seco para disminuir el contenido de humedad.

Con los datos obtenidos se estaba en disposición de obtener el límite líquido.

3.5. Presentación de los resultados

La determinación del límite líquido se realiza mediante un ábaco en doble escala logarítmica como el que se adjunta a continuación. En el cual, el número de golpes figura en el eje de abscisas y la humedad en las ordenadas.

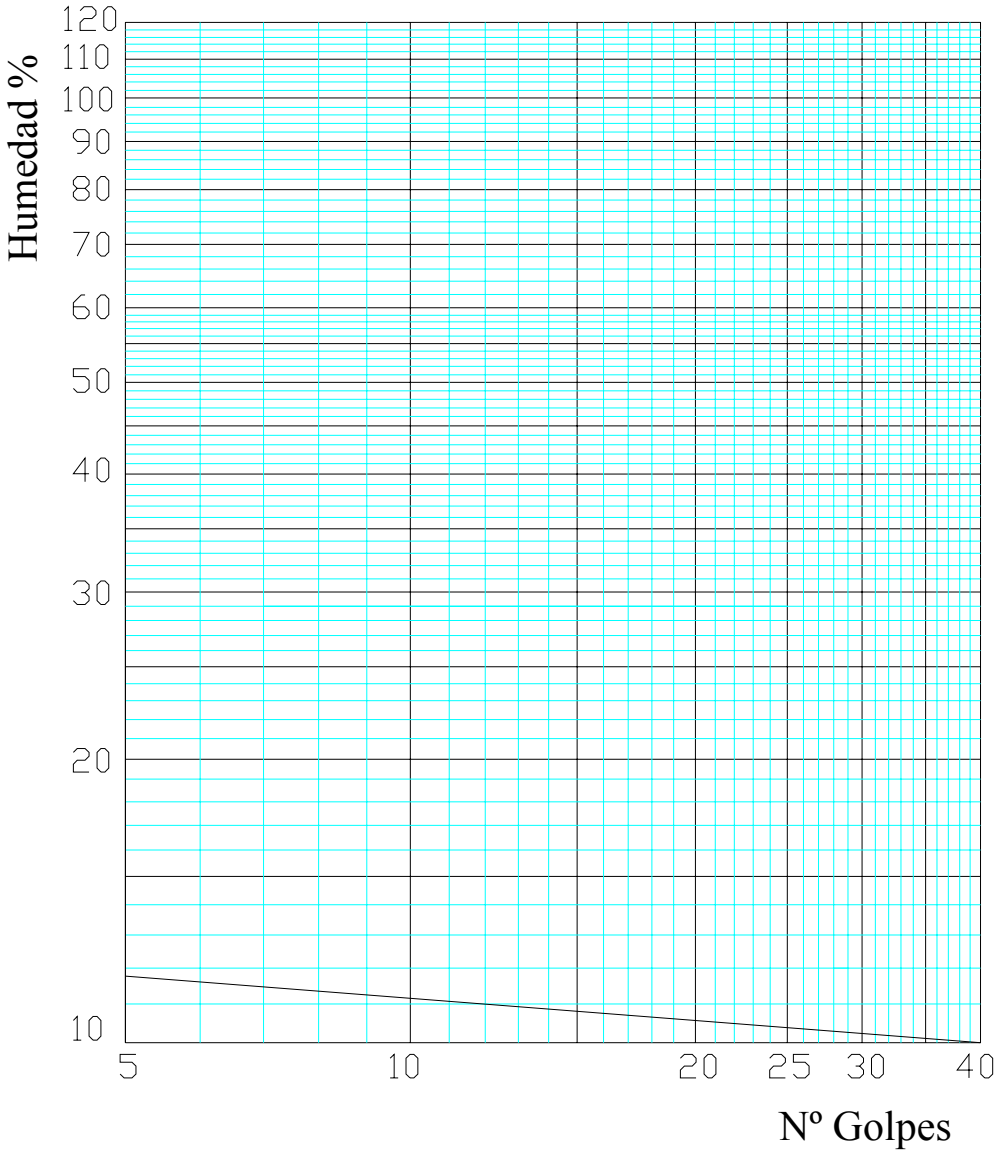

Gráfico 8. Ábaco utilizado para la obtención del límite líquido

Todos los resultados que se han obtenido se presentan en el Anejo 1 usando el ábaco mostrado.

La determinación del límite líquido es sencilla una vez obtenida la humedad y el número de golpes correspondiente. Basta, como ya se explicó en el Capítulo 1,

representar el punto obtenido en dicho gráfico y, una vez dibujado, se traza por él una recta paralela a la que aparece en el ábaco, de pendiente -0,117, y la humedad del punto de corte con la ordenada correspondiente a los 25 golpes dará el límite líquido.