

90
2 eje.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

CONTENIDO DE AGUA Y LIMITE LIQUIDO
DE SUELOS: UNA REVISION DE TECNICAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

MARCOS OROZCO CALDERON

México, D. F.,

1994

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

Señor
MARCOS OROZCO CALDERON
Presente.

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-129/92

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. **MANUEL J. MENDOZA LOPEZ**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

"CONTENIDO DE AGUA Y LIMITE LIQUIDO DE SUELOS: UNA REVISION DE TECNICAS"

- I. INTRODUCCION
- II. TECNICAS PARA EL SECADO DE SUELOS
- III. TECNICAS PARA DETERMINAR EL LIMITE LIQUIDO
- IV. EVALUACION EXPERIMENTAL DE LAS TECNICAS PARA EL SECADO DE SUELOS
- V. DETERMINACIONES DEL CONTENIDO DE AGUA CON EL HORNO DE CONVECCION Y EL DE MICROONDAS
- VI. EVALUACION EXPERIMENTAL DE LAS TECNICAS PARA DETERMINAR EL LIMITE LIQUIDO
- VII. DETERMINACIONES DEL LIMITE LIQUIDO EN SUELOS DE LA CIUDAD DE MEXICO CON LA COPA DE CASAGRANDE Y EL CONO SUECO
- VIII. LA PENETRACION DEL CONO SUECO PARA MEDIR LA RESISTENCIA NO DRENADA
- IX. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, a 16 de mayo de 1994.
EL DIRECTOR.


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/RCR*nl1

A mis padres

*Cleto M. Orozco Ramírez
Elia Calderón de Orozco*

*Con todo mi amor, respeto y agradecimiento
por sus invaluable esfuerzos y sacrificios
realizados para apoyar mi superación*

A mis hermanos

*Antonia, Vianney, Quirino,
Manuel, Areli y Celia*

por su apoyo moral y entusiasmo que me brindan

A mis familiares

por su cariño

*A la Facultad de Ingeniería de la UNAM
y a sus profesores*

A G R A D E C I M I E N T O S

Agradezco ampliamente al M. en I. Manuel J. Mendoza López por su atinada dirección durante el desarrollo del presente trabajo, por compartir sus conocimientos académicos y por revisar pacientemente el texto.

A la familia Orozco-Rivera y al Ing. Miguel Orozco M. por su loable y desinteresado apoyo durante mis estudios.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por la beca recibida durante la realización de esta tesis.

A todos mis amigos, compañeros y al personal de la sección de Geotecnia del Instituto de Ingeniería de la UNAM, que de alguna manera contribuyeron a la realización de la tesis.

CONTENIDO

NOTACION	v
1. INTRODUCCION	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Organización de la tesis	2
2. TECNICAS PARA EL SECADO DE SUELOS	4
2.1 Contenido de agua	4
2.2 Revisión de técnicas para el secado de suelos	5
2.2.1 Técnica de secado en el horno de convección (HC)	6
a) <i>Equipo</i>	6
b) <i>Tamaño de las muestras</i>	7
c) <i>Procedimiento</i>	7
2.2.2 Técnica que se basa en la medición de la presión de gas, producido por la reacción del carburo de calcio con el agua	8
a) <i>Uso de la técnica</i>	9
b) <i>Equipo</i>	9
c) <i>Riesgos</i>	9
d) <i>Calibración del equipo con la técnica tradicional</i>	9
e) <i>Tamaño de las muestras</i>	10
f) <i>Procedimiento</i>	10
2.2.3 Técnica del secado intensivo	11
a) <i>Uso de la técnica</i>	11
b) <i>Equipo</i>	12
c) <i>Riesgos</i>	12
d) <i>Tamaño de las muestras</i>	12
e) <i>Procedimiento</i>	12
2.2.4 Técnica del alcohol	13
2.2.4.1 Basado en su combustión	13
a) <i>Equipo</i>	13
b) <i>Procedimiento</i>	13
c) <i>Riesgos</i>	14
2.2.4.2 Basado en los cambios de su densidad	14
a) <i>Equipo</i>	16
b) <i>Procedimiento</i>	17
2.2.5 Basado en el cambio volumétrico	17
a) <i>Equipo</i>	19
b) <i>Procedimiento</i>	19
2.2.6 Por medio de rayos infrarrojos	23

2.2.7	Técnica del tolueno	23
	a) <i>Equipo</i>	23
	b) <i>Procedimiento</i>	24
2.2.8	Técnica de secado en el horno de microondas (HMO)	25
2.2.8.1	Calentamiento por microondas	25
2.2.8.2	Secado de suelos con microondas	26
	a) <i>Equipo</i>	30
	b) <i>Procedimiento</i>	30
2.2.9	Técnica que usa aparatos nucleares	31
	a) <i>Medida de la humedad en el lugar</i>	31
	b) <i>Equipo</i>	31
	c) <i>Comentarios acerca de la ventajas y desventajas de su uso</i>	35
3.	TECNICAS PARA DETERMINAR EL LIMITE LIQUIDO	36
3.1	Técnica de la Copa de Casagrande	36
3.2	Conos penetrantes	37
	3.2.1 Cono sueco	38
	3.2.2 Cono de la URSS	40
	3.2.3 Cono del Instituto Tecnológico de Georgia (E.U.A.)	40
	3.2.4 Cono inglés	41
	3.2.5 Cono indio	42
3.3	Curvas de fluidez	42
3.4	Penetración de una barra de acero	44
3.5	Correlaciones entre los conos penetrantes y la copa de Casagrande	46
	3.5.1 Límites de consistencia, <i>Karlsson, R. & The Laboratory Committee of the Swedish Geotechnical Society (1981)</i>	46
	3.5.2 Límite líquido de suelos, <i>Sivapullaiah y Sridharan (1985)</i>	49
	3.5.3 Límites líquido y plástico determinados con el cono que cae y la copa de Casagrande, <i>Wasti (1987)</i>	49
	3.5.4 Determinación del límite líquido de suelos con el cono sueco, <i>Mendoza (1991)</i>	51
4.	EVALUACION EXPERIMENTAL DE LAS TECNICAS PARA EL SECADO DE SUELOS	61
4.1	Suelos ensayados	61
4.2	Técnicas y equipos utilizados	62
	4.2.1 Técnicas utilizadas	62
	4.2.2 Equipos utilizados	63
4.3	Procedimiento de ensaye	65
	4.3.1 Horno de convección	66
	4.3.2 Horno de microondas	66
	4.3.3 Secado intensivo en estufa	66
	4.3.4 Técnica del alcohol, basado en su combustión	66
	4.3.5 Técnica del tolueno	67

4.4	Análisis de resultados	69
4.4.1	Horno de microondas (HMO) - horno de convección (HC)	69
4.4.2	Secado intensivo en estufa - horno de convección	73
4.4.3	Técnica del alcohol - horno de convección	75
4.4.4	Técnica del tolueno-horno de convección	78
4.5	Análisis de la variabilidad de los resultados en cada técnica	81
5.	DETERMINACIONES DEL CONTENIDO DE AGUA CON EL HORNO DE CONVECCION Y EL DE MICROONDAS	88
5.1	Determinación del comportamiento de las curvas de secado para diferentes PHI y niveles de potencia del HMO	88
5.1.1	Curvas de secado	89
5.2	Secado de Caolín y Bentonita I con diferentes PHI en el HC y HMO	94
5.2.1	Materiales usados	94
5.2.2	Procedimiento de secado	95
5.2.3	Resultados obtenidos	95
5.3	Secado de muestras de Caolín y Bentonita I con potencia 8 del HMO	103
6.	EVALUACION EXPERIMENTAL DE LAS TECNICAS PARA DETERMINAR EL LIMITE LIQUIDO	106
6.1	Suelos ensayados	106
6.2	Equipo utilizado	106
6.3	Procedimiento de ensaye	106
6.4	Análisis de resultados	109
6.4.1	Correlación entre las técnicas	109
6.4.1.1	Cono sueco vs copa de Casagrande	109
	<i>a) Secado en el Horno de Convección</i>	109
	<i>b) Secado en el Horno de Microondas</i>	113
6.4.1.2	Cono inglés vs copa de Casagrande	115
	<i>a) Secado en el Horno de Convección</i>	115
	<i>b) Secado en el Horno de Microondas</i>	118
6.4.1.3	Cono sueco vs cono inglés	120
	<i>a) Secado en el Horno de Convección</i>	120
	<i>b) Secado en el Horno de Microondas</i>	123
6.4.2	Influencia del operador	126
6.4.3	Correlación entre los límites líquidos obtenidos en el HMO y HC para la copa de Casagrande, cono sueco y cono inglés	128
7.	DETERMINACIONES DEL LIMITE LIQUIDO EN SUELOS DE LA CIUDAD DE MEXICO CON LA COPA DE CASAGRANDE Y EL CONO SUECO	134
7.1	Muestras ensayadas, equipo y procedimiento de ensaye	134

7.2	Resultados de la investigación	134
7.3	Ubicación de las muestras en la carta de plasticidad	137
7.4	Correlación entre el HMO y HC	139
8.	LA PENETRACION DEL CONO SUECO PARA MEDIR LA RESISTENCIA NO DRENADA	144
8.1	Antecedentes	144
8.2	Comparación entre los métodos del cono y la veleta	144
9.	CONCLUSIONES	150
	REFERENCIAS	156

NOTACION

C_u	Resistencia cortante no drenada del suelo
G_s	Densidad de sólidos
HC	Horno de convección
HMO	Horno de microondas
PHI	Peso húmedo inicial
PI	Índice de plasticidad
r	Coefficiente de correlación
V_s	Volumen de sólidos, cm^3
V_w	Volumen de agua, cm^3
$w(\%)$	Contenido de agua, %
w_{ALCOHOL}	Contenido de agua obtenido con la técnica del alcohol
w_c	Contenido de agua estimado, %
w_{ESTUFA}	Contenido de agua obtenido al secar la muestra en la estufa
w_{HC}	Contenido de agua obtenido con el horno de convección
w_{HMO}	Contenido de agua obtenido con el horno de microondas
w_L	Límite líquido
w_{Copa}	Límite líquido obtenido con la copa de Casagrande
$w_{\text{Cono indio}}$	Límite líquido obtenido con el cono indio
$w_{\text{Cono inglés}}$	Límite líquido obtenido con el cono inglés
$w_{\text{Cono sueco}}$	Límite líquido obtenido con el cono sueco
w_{HC}	Límite líquido obtenido al secar las muestras en el horno de convección
w_{HMO}	Límite líquido obtenido al secar las muestras en el horno de microondas
w_p	Límite plástico
w_s	Límite de contracción
w_{TOLUENO}	Contenido de agua obtenido con la técnica del tolueno
w_{ALCOHOL}	Peso de alcohol, g
w_s	Peso de las partículas sólidas del suelo
w_{sh}	Peso del suelo húmedo, g
w_w	Peso del agua, removida por calentamiento
ΔV	Incremento de volumen, cm^3
γ_n	Peso específico del agua, g/cm^3
γ_s	Peso específico de sólidos, g/cm^3
σ_x^2	Variación de la muestra
σ_x	Desviación estándar
ν_x	Coefficiente de variación

Además de las indicadas explícitamente en el texto.

1. INTRODUCCION

1.1 Generalidades

El control de calidad de las obras de ingeniería es necesaria para garantizar su buen comportamiento. Esto obliga, entre otros trabajos, a que se adopte un sistema de inspección, muestreo y pruebas que permita conocer las características físicas de la construcción, así como sus variaciones.

El contenido de agua es un parámetro importante en el control de la compactación de terraplenes, para conocer la relación humedad-peso volumétrico del suelo; ello exige conocerlo en un tiempo corto para aceptar o rechazar el tendido de un material. Tradicionalmente se recurre a un horno de convección (HC) para el secado de suelos y determinar finalmente su contenido de agua (w%), que generalmente toma un día. Aunque lo anterior trata sobre un caso particular, sin duda importante, el contenido de agua es un índice general de los suelos no granulares de uso más general.

Por otra parte, la clasificación de los suelos se hace con base en los límites de Atterberg y en los índices asociados. Se parte de que un suelo fino sólo puede existir en cuatro estados de consistencia según su contenido de agua: sólido, semisólido, plástico y líquido. Las fronteras entre los estados mencionados se les llama *límites de consistencia* y son: de contracción, plástico y líquido, respectivamente. El límite líquido y el *índice plástico* (definido como la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico) constituyen una medida de la plasticidad de un suelo.

Tradicionalmente se ha usado la copa de Casagrande para determinar el límite líquido (w_L), la prueba resulta ser de percusión en donde la influencia del operador es significativa en los resultados que se obtienen. Para eliminar en gran parte este problema, se han propuesto técnicas alternativas basadas en la penetración de conos que caen por su propio peso, a partir de una posición en reposo. Entre los diversos conos penetrantes se pueden citar el *cono sueco* y el *cono inglés*.

Entonces, es posible que al conjuntar las técnicas alternativas *cono sueco-HMO* y *cono inglés-HMO*, puede reducirse la determinación del límite líquido en poco menos de una hora lo que hace factible su implementación en los laboratorios de Mecánica de Suelos del país.

1.2 Organización de la tesis

La definición de *contenido de agua* y la revisión de técnicas para el secado de suelos, junto con su procedimiento se expone en el capítulo 2.

En el capítulo 3 se describen las diferentes técnicas para determinar el límite líquido de los suelos y correlaciones experimentales entre los conos penetrantes con la copa de Casagrande obtenidas por diferentes investigadores.

El capítulo 4 contiene la evaluación experimental de las técnicas de secado siguientes:

- ▶ Horno de convección (HC)
- ▶ Horno de microondas (HMO)
- ▶ Secado intensivo en estufa
- ▶ Del alcohol, basado en su combustión
- ▶ Del tolueno

con ocho diferentes suelos y las correlaciones estadísticas obtenidas para los contenidos de agua alcanzados, se presenta además el análisis de la variabilidad de los resultados para cada técnica. Las técnicas de secado incluidas en el programa experimental, corresponden a las que se pueden utilizar ampliamente en campo y reducen la mayor limitante (el tiempo) que se tiene en el HC pudiendo así tomar una decisión para rechazar o aceptar el tendido de un material.

El proceso del calentamiento por la acción de microondas y su efecto en el secado de suelos, solo es posible conocerlo con la experiencia práctica. El principio del calentamiento por microondas, la aplicación en el secado de suelos y programas experimentales llevados a cabo para correlacionar la técnica del HC y la del HMO se incluyen en el capítulo 5. Se comprueba la variabilidad en el contenido de agua de porciones de una misma muestra, bajo la acción de un mismo ambiente de secado, sea por el HC o HMO. Se demuestra en forma experimental la validez de utilizar el HMO para secar las muestras de suelo pequeñas (menores a 8 g), similares a las que se utilizan para obtener un punto de la curva de fluidez en la determinación del límite líquido.

La utilización de dos conos penetrantes, sueco e inglés, en forma simultánea con la copa de Casagrande para determinar el límite líquido de diferentes suelos representativos de la carta de

plasticidad, se presenta en el capítulo 6. Además de ser secadas las muestras en el HC se utilizó en forma paralela el HMO; con esto se obtuvieron correlaciones estadísticas entre los límites líquidos de cada técnica, de *cono sueco-copa de Casagrande*, *cono inglés-copa de Casagrande* y *cono sueco-cono inglés* para ambos hornos. Se comenta también la influencia del operador en cada técnica.

Para diferentes muestras de arcilla de la ciudad de México, se les determinó su límite líquido con el cono sueco y la copa de Casagrande simultáneamente, pudiéndose así obtener una correlación lineal, aunque no numérica, de ambos valores de límite líquido. Se presenta una correlación entre contenidos de agua determinados en el HC y HMO para algunas de las muestras. Todo esto en el capítulo 7.

En el capítulo 8 se incluye una revisión bibliográfica para mostrar que la penetración del cono sueco proporciona una medida de la resistencia no drenada de los suelos finos, c_u , con valor de 1.7 KPa. Una resistencia similar la proporciona el cono inglés. Dichas resistencias son en su respectivo límite líquido.

Finalmente en el capítulo 9 se incluyen las conclusiones de este trabajo.

2. TECNICAS PARA EL SECADO DE SUELOS

En este capítulo se presentan diferentes técnicas para el secado de los suelos, mismas que tienen por objeto proporcionar el valor de su contenido de agua. El poder utilizar cualesquiera de las técnicas presentadas en este capítulo en la práctica, depende del equipo con que se cuenta.

2.1 Contenido de agua

Los suelos son sistemas discontinuos y generalmente se componen de varias proporciones de minerales, partículas orgánicas y de fluidos. Los fluidos son generalmente aire y agua. La división tradicional del estado del agua se basa en las *formas*: *agua gravitacional*, *agua capilar*, *agua higroscópica*, etc. El concepto del *potencial suelo-agua* se considera de mayor importancia para la determinación del estado y movimiento del agua (Hillel, 1971).

El potencial total del agua puede considerarse como la suma del *potencial gravitacional*, el *potencial mátrico* y el *potencial osmótico*, principalmente. El potencial gravitatorio es independiente de las condiciones químicas y de presión del agua pero dependiente de una posición relativa. El potencial mátrico se compone de las fuerzas resultantes de la capilaridad y adsorbidas por las partículas del suelo, mientras que el potencial osmótico requiere una membrana semipermeable para inducir el flujo del líquido.

El contenido de agua o humedad se ha definido como la relación entre el peso de agua contenida en los espacios porosos del suelo y el peso del material seco (partes sólidas), es decir:

$$w (\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (2.1)$$

donde

$w (\%)$ contenido de agua, en %
 W_w peso del agua, removida por calentamiento
 W_s peso de las partículas sólidas del suelo

El peso del agua corresponde a la removida por calentamiento a una temperatura y tiempo estandarizados por la norma ASTM-D2216-90. Por lo que se refiere a la parte sólida, debe entenderse que son aquellas partículas que nos son fácilmente solubles en agua y que pueden tener agua adsorbida que constituyen parte de su fase sólida; es decir, que no se remueve por calentamiento.

El obtener el contenido de agua resulta ser una tarea cotidiana en un laboratorio de Mecánica de Suelos, además de ser la prueba más simple que se realiza. El determinar este índice puede ofrecer un significado importante al correlacionarlo con sus propiedades ingenieriles; como pueden ser: la densidad de sólidos, relación de vacíos, índice de plasticidad, resistencia a la compresión simple con el contenido de agua *natural* (Marsal y Mazari, 1969).

2.2 Revisión de técnicas para el secado de suelos

Cotidianamente, en campo, se requiere tener un control eficiente durante la construcción de una obra térrea, por ejemplo un terraplén, en donde es necesario conocer parámetros que le puedan indicar al ingeniero constructor si las propiedades que tiene el material son las adecuadas; tal es el caso de la compactación. Estos parámetros están, muchas veces, en función del contenido de agua y por lo tanto es un valor a determinar con rapidez, dado que en la aceptación o rechazo de un tendido de material no se dispone de mucho tiempo. Para el secado de los suelos, generalmente se utiliza un horno de convección (HC) a una temperatura definida hasta obtener *peso constante*, lo que usualmente toma un día. La necesidad de obtener el contenido de agua en un tiempo corto y en campo, obliga al ingeniero a innovar técnicas alternativas a la llamada tradicional.

La mayoría de las técnicas que se han innovado se enfocan principalmente para ser utilizadas en campo y que deben de proporcionar los valores de una forma rápida, confiable y económica para tener y llevar un buen control de calidad. En la Tabla 2.1 se muestran algunas referencias donde se hace mención de las técnicas utilizadas por diferentes investigadores y que a continuación se presenta un resumen de cada una de ellas.

Tabla 2.1. Técnicas para el secado de suelos con objeto de determinar el contenido de agua

REFERENCIA	HC	EQUIPO NUCLEAR	HMO	CARBURO DE CALCIO	SECADO EN ESTUFA	ALCOHOL	VOLUMETRICÓ	RAYOS INFRARROJOS	HILF	TO LUENO
ASTM STANDARS (1991)	X	X	X	X	X					
SABORIO Y ZARATE (1964)	X	X			X	*	X	X		
A. RICO (1977)	X	X		X	X	**	X		X	
ELLSTEIN (1982)	X									X

* Basado en el cambio de su densidad

** Basado en su combustión

2.2.1 Técnica de secado con el horno de convección (HC)

Esta técnica o método se le ha llamado comúnmente como la *tradicional* en el campo de la ingeniería de Mecánica de Suelos. Ha sido estandarizada por la ASTM (American Society for Testing and Materials) bajo la designación D2216 (*ASTM D2216-90, 1991*) y en base al uso de esta técnica se ha definido lo que se llama *peso seco del material*.

Para el secado de una muestra de suelo es necesario que la muestra de suelo permanezca dentro de un horno de convección, mismo que debe mantener una temperatura entre $110 \pm 5^\circ \text{C}$, hasta que alcance un peso constante. El tiempo que se requiere para alcanzar dicho peso varía dependiendo del tipo de material, tamaño de la muestra y de otros factores, pero por lo menos deben ser 16 horas.

a) Equipo

- HORNO Se prefiere el de tipo convección que sea capaz de mantener una temperatura uniforme entre $110 \pm 5^\circ \text{C}$ en toda la cámara del horno.
- BALANZA Para muestras con peso menor de 200 g se requiere con precisión de 0.01 g, para un peso mayor a 200 g una con 0.1 g de precisión.
- RECIPIENTES Los recipientes para las muestras deberán ser resistentes a la corrosión y al cambio de su peso por el calentamiento y enfriamiento.
- DESECADOR Debe ser un recipiente que contenga gel de sílice. El cambio de color del sílice indica la necesidad de sustituirlo.
- OTRO Espátulas, pinzas, mortero, guantes, franelas y demás equipo necesario.

b) Tamaño de las muestras

Para esta técnica, la norma recomienda que el espécimen del material húmedo sea representativa de la muestra total y con un peso mínimo de acuerdo a lo presentado en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Peso recomendado mínimo para ser secado en el horno de convección

Tamaño máximo de las partículas (mm)	Malla número	Peso mínimo recomendado para un reporte de $\pm 0.1\%$ de w (g)	Peso mínimo recomendado para un reporte de $\pm 1.0\%$ de w (g)
2 o menos	10	20	20*
4.75	4	100	20*
9.5	3/8"	500	50
19.0	3/4"	2.5 kg	250
7.5	1 1/2"	10 kg	1 kg
75.0	3"	50 kg	5 kg

* Para ser representativa no deberá ser menor de 20 g

c) Procedimiento

El procedimiento detallado puede verse en la norma ya citada, a continuación se resume:

1. Determinar el peso del recipiente limpio y seco, además de identificarlo con número o marca.
2. Seleccionar la muestra representativa para la prueba, tomando en cuenta lo indicado en la Tabla 2.2.
3. Colocar la muestra húmeda en el recipiente y determinar el peso del recipiente más la muestra húmeda usando la balanza apropiada; anotar el valor en el registro.
4. Colocar el recipiente que contiene la muestra en el horno de convección para obtener el peso seco. El horno debe mantener la temperatura marcada por la norma y el tiempo que se requiere para alcanzar el peso seco es de por lo menos 16 horas.
5. Ya que el material se ha secado, teniendo un peso constante, deberá removerse el recipiente del horno para colocarlo en el desecador, donde adquirirá la temperatura ambiente y sea manejable. Se determina el peso del recipiente juntamente con el material secado en el horno usando la misma balanza en el paso 3; anotar el valor en el registro.
6. Finalmente calcular el contenido de agua del material usando la siguiente expresión:

$$w(\%) = \frac{W_{csh} - W_{css}}{W_{css} - W_c} \times 100 = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (2.2)$$

donde

w (%)	contenido de agua, en %
W_{csh}	peso del recipiente con el suelo húmedo
W_{css}	peso del recipiente con el suelo seco
W_c	peso del recipiente
W_w	peso de agua
W_s	peso del suelo seco

En el reporte debe anotarse el tipo de material, número de muestra, número de prueba, sondeo, profundidad, tipo de recipiente con su número, además de indicar si la muestra perteneció a un solo material o de diferentes (pequeños estratos).

Debe quedar claro que esta técnica es la que generalmente se usa en un laboratorio de Mecánica de Suelos, además es la que mundialmente se usa y que sirve de referencia para las otras técnicas de secado; es decir, si se usa otra técnica alternativa el resultado obtenido deberá compararse con ésta para tener plena seguridad del resultado. En el capítulo 4 se presentan correlaciones experimentales entre diferentes técnicas con el horno de convección, para un peso húmedo inicial (PHI) de 30 g en cada una de ellas. En pruebas de rutina en laboratorio, como la determinación del límite líquido (w_L) de los suelos, no es posible llevar a cabo la recomendación hecha en la Tabla 2.2 por carecer de gran cantidad de suelo, pero no resulta ser una limitante como se demuestra en los capítulos 4 a 7. Aunque la técnica resulta ser la de referencia, debe anotarse que existen variaciones comprobadas en los contenidos de agua obtenidos del mismo suelo, como lo demuestran los resultados experimentales que se presentan en el capítulo 5 de este trabajo.

2.2.2 Técnica que se basa en la medición de la presión del gas producido por la reacción del carburo de calcio con el agua

Se basa en la reacción química del carburo de calcio, que es el reactivo, con el agua disponible en la muestra de suelo. El gas producido por la reacción química es acetileno y la presión que ejerce en la cámara es posible medirla para correlacionarla con la cantidad de agua de la muestra del suelo. La técnica está estandarizada por la ASTM bajo la designación D4944 y se le conoce como *Speedy Moisture Tester*. Se presenta en forma detallada y el procedimiento a seguir en la referencia *ASTM D4944-89 (1991)*.

El uso de esta técnica no puede sustituir a la tradicional D2216, pero puede ser una alternativa a usar en campo, o cuando el horno no puede usarse, y su aplicación puede ser en la mayoría de los suelos.

La mezcla del reactivo con el agua del suelo se lleva a cabo con la ayuda de dos esferas de acero y se realiza por agitación en el interior de una cámara hermética. La producción de gas acetileno dentro de la cámara es proporcional a la cantidad de agua disponible en la muestra. El contenido de agua aparente se podrá leer en el manómetro que está conectado a la cámara del aparato, calibrado para leer por ciento el contenido de agua de una cantidad de suelo especificada.

Previamente a su uso se requiere hacer diferentes mediciones experimentales que permitan formar

una curva de calibración que incluya la presión del manómetro leída y el contenido de agua determinado con el método D2216.

a) Uso de la técnica

De igual forma que la anterior se utiliza para la determinación del contenido de agua, es un método práctico y de fácil transportación y generalmente se usa en campo.

b) Equipo

- Aparato para realizar la prueba de medición de la presión del gas producido por la reacción del carburo de calcio y el agua de la muestra.
- Cuchara pequeña para medir el reactivo.
- Dos esferas de acero.
- Brocha o paño para limpieza.
- Malla número 4 (4.75 mm).
- Suministro de carburo de calcio. El tamaño de las partículas del carburo de calcio no será mayor a la malla número 50 (300 μm) y no más del 10% que pueda pasar la malla número 140 (106 μm).
- Equipo de limpieza y seguridad, como gafas para protección contra el polvo y gases.
- El equipo listado en el procedimiento D2216 (inciso 2.2.1) para poder realizar la comparación y hacer las curvas de calibración.

c) Riesgos

Debido a la reacción originada por la combinación del carburo de calcio y agua se produce gas acetileno altamente explosivo e inflamable; la prueba no deberá llevarse a cabo en lugares cerrados o cerca de flamas, brasas u otra fuente de calor que pueda causar combustión. Deberá tenerse cuidado cuando se libera el gas del aparato y se hará fuera del alcance del operador.

El operador usará mascarilla, guantes de manga larga, gafas para prevenir la irritación en los ojos o problemas en el sistema respiratorio.

d) Calibración del equipo con la técnica tradicional

En el control de calidad de una obra térrea generalmente se define el intervalo especificado de variación del contenido de agua; entonces, las curvas de calibración deberán desarrollarse para cada equipo y tipos de suelos en dicho intervalo. Se ha visto que para una curva de calibración obtenida con un aparato, no puede ser usada con otro aparato diferente.

Si las pruebas serán hechas por largo tiempo y en el mismo suelo, la curva de calibración deberá ser lo suficientemente exacta, y no usarse por mas de 12 meses. Para realizar la curva se requiere que las muestras de suelo representen los diferentes materiales por ensayar, teniendo un intervalo relativo de contenido de agua. Cada muestra se dividirá en dos especímenes, uno de ellos se secará de acuerdo a este método y el segundo de acuerdo al estándar D2216.

Los resultados del contenido de agua obtenidos con el D2216 del total de las muestras seleccionadas, serán dibujadas contra la presión leída en el manómetro de la cámara del aparato. Una curva se dibuja a través de los puntos para formar la curva de calibración de los suelos ensayados; o bien, utilizando alguna técnica de regresión estadística, como puede ser el ajuste de mínimos cuadrados, para anular la influencia de quien trace la curva. En la Fig 2.1 se presenta una curva típica de calibración.

METODO DEL CARBURO DE CALCIO CURVA DE CALIBRACION

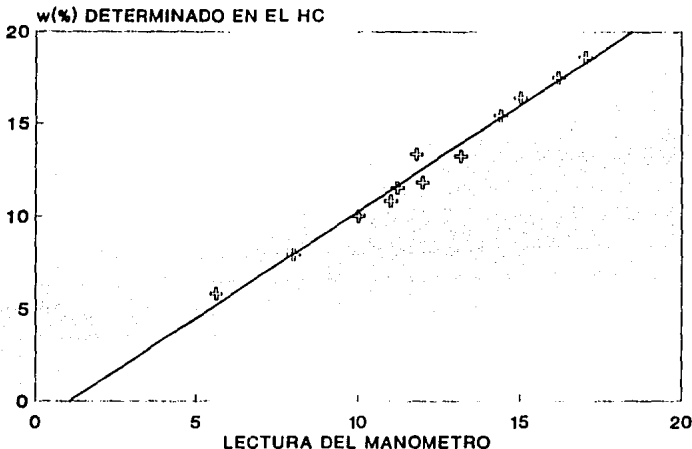


Fig 2.1 Curva de calibración, método del carburo de calcio-HC (ASTM D4944, 1991)

e) Tamaño de las muestras

Es claro que para obtener el contenido de agua en forma paralela con otro método se deberán tener en cuenta los requerimientos del modo de manejo, y selección del espécimen que gobierna a cada prueba. Para la técnica del carburo de calcio se requiere que los especímenes sean pequeños, se debe principalmente a las limitaciones del equipo, y que pasen la malla número 4.

f) Procedimiento

1. Remover la cápsula del aparato de prueba y colocar la cantidad de carburo de calcio recomendada junto con las dos esferas de acero dentro de la cámara de prueba. La mayoría de los equipos construidos requieren aproximadamente 22 g de reactivo por 20 g de suelo húmedo.
2. Usar la balanza para obtener el peso del suelo estimado.
3. Colocar el espécimen del suelo en la cámara; entonces, con el aparato en posición horizontal, insertar la cápsula en la cámara y apretar la abrazadera para sellar la cápsula.

4. Levantar el aparato en forma horizontal para que el contenido de la cápsula caiga dentro de la cámara. Golpear un lado del aparato con la mano abierta para asegurar que todo el material caiga de la cápsula.
5. Sacudir el aparato vigorosamente y rotándolo para hacer que las esferas de acero recorran la circunferencia y puedan moler el suelo con el reactivo. El tiempo de agitado del aparato depende del tipo de material que se ensaye. Para arenas se requiere 1 minuto y para arcillas por lo menos 3 minutos.
6. Con el aparato en forma horizontal se lee la lectura en el manómetro y se usa la curva de calibración para determinar el contenido de agua en porciento. Se recomienda dejar el tiempo necesario para que el gas producido por la reacción se estabilice.
7. Teniendo la tapa del aparato en forma horizontal, se deja escapar en forma lenta el gas. Al vaciar la cápsula deberá examinarse el espécimen y si no está completamente pulverizado, el ensaye deberá repetirse usando un nuevo espécimen.
8. Permitir el enfriamiento del aparato y limpiarlo con una brocha antes de realizar otro ensayo.
9. Desechar el espécimen en un lugar donde no pueda estar en contacto con agua y produzca un gas explosivo.

2.2.3 Técnica de secado intensivo

Se entenderá como secado intensivo o secado directo al proceso por el cual el suelo es secado por conducción de calor desde el lugar de aplicación en forma directa. La fuente de calor puede ser un hornillo, estufa (de gas o eléctrica) mechero u otra.

Este método no pretende ser un sustituto de la ya comentada D2216, pero cuando el contenido de agua es requerido en forma rápida, bien puede aceptarse para apresurar otras fases de las pruebas o trabajos. El D2216 será usado para comparar la exactitud de los resultados y pueda proporcionar la correlación entre ambas técnicas.

La mayoría de los suelos se pueden secar usando esta técnica, pero si su composición mineralógica es de haloisita, mica, montmorilonita, yeso u otro material hidratado, suelos con un gran contenido de materia orgánica o suelos con alto contenido de sales (como es el caso de los suelos marinos), ésta no proporciona valores aceptables del contenido de agua. Es probablemente la técnica más popular y usada en campo cuando se requiere conocer el contenido de agua en un lapso corto.

a) Uso de la técnica

La muestra puede sufrir sobrecalentamiento cuando se usa esta técnica, de tal manera que produzca un contenido de agua mayor al que puede obtenerse con el D2216.

El procedimiento generalmente es aplicable a todos los suelos. Si se usa en forma regular para un suelo dado o sobre suelos similares de un sitio, puede determinarse una correlación entre los resultados de éste y el D2216.

No se recomienda que los especímenes usados con éste método, se reusen para otras pruebas dado

que es posible que hayan sufrido cambios químicos.

En aquellos materiales que contengan contaminantes inflamables u orgánicos, se recomienda usar otra técnica.

b) Equipo

- Fuente de calor. Puede ser cualquiera que proporcione una temperatura superior los 110° C; por ejemplo: estufas eléctricas o de gas, hornillos, quemador, etc.
- Balanza con capacidad de 2 kg y de 0.1 g de precisión.
- Recipientes adecuados hechos con material resistente a la corrosión y al cambio de su peso debido al calentamiento y enfriamiento.
- Guantes de asbesto o equipo sustituible para la remoción del recipiente de la fuente de calor después de haber sido calentado.
- Espátulas, equipo de limpieza y demás necesario.

c) Riesgos

Por lo general los recipientes pueden alcanzar temperaturas altas, es por ello que se recomienda usar guantes de asbesto. Algunas partículas del suelo pueden romperse durante el secado, mezclado por lo que se recomienda usar lentes protectores.

d) Tamaño de las muestras

La norma antes citada recomienda el peso que se incluye en la Tabla 2.3, en función del número de la malla.

Tabla 2.3 Peso recomendado mínimo para ser secado con la técnica de secado intensivo

Número de malla que retiene más del 10% de la muestra, (mm)	Peso mínimo del espécimen húmedo (g)
2.0 (No. 10)	200 a 300
4.75 (No. 4)	300 a 500
19.0 (No. 3/4)	500 a 1000

e) Procedimiento

1. Determinar el peso del recipiente, seco y limpio.
2. Después de haber seleccionado la muestra representativa, colocarla en el recipiente y determinar su peso.
3. Aplicar la fuente de calor al recipiente que contiene el suelo, teniendo cuidado de evitar su sobrecalentamiento, y continuar secando hasta que el suelo parezca seco. Una forma de

- darse cuenta de que el suelo ya está seco es de colocar encima un vidrio de reloj y ver si se condensan gotas de agua.
4. Después de que el tiempo de calentamiento inicial ha sido terminado, remover el recipiente de la fuente de calor y enfriarlo para que pueda ser manejable y evitar dañar a la balanza al momento de pesarlo. Puede colocarse el recipiente en agua de modo que flote para acelerar su enfriamiento.
 5. Con una espátula pequeña o cuchilla mezclar cuidadosamente el suelo, teniendo cuidado de no perder partículas de suelo.
 6. Colocar el recipiente con el suelo a la fuente de calor para una nueva aplicación.
 7. Repetir los pasos 3 a 5 hasta que el cambio entre dos determinaciones del peso no tenga un efecto significativo en el contenido de agua. Es común aceptar un cambio de 0.1 % entre dos determinaciones del peso seco del material.
 8. Para determinar el contenido de agua, se deberá usar la última determinación del peso seco del material.

En el inciso 4.4.2 del capítulo 4 se presentan los resultados de un programa experimental usando una estufa (del tipo casera) para secar una gran variedad de suelos y determinar su contenido de agua. Se correlaciona en forma estadística los resultados obtenidos con la técnica del IIC demostrando que el secado de suelos con una estufa produce resultados muy satisfactorios, mismos que alientan el uso cotidiano de esta técnica para secar suelos.

2.2.4 Técnica del alcohol

El uso del alcohol para determinar el contenido de agua, similar al que se obtiene con el D2216, puede aplicarse en dos modalidades:

2.2.4.1 Basado en su combustión

Se basa en que cuando se disgrega el suelo húmedo en una cantidad de alcohol prefijada y al quemar éste hasta su combustión total, el residuo se supone que es la fase mineral del suelo ya totalmente seca. El cálculo del contenido de agua se realiza utilizando la expresión (2.2).

a) Equipo

- | | | |
|---|-------------|---|
| ○ | RECIPIENTES | Deberán ser resistentes a la corrosión y al cambio de su peso por el constante calentamiento y enfriamiento |
| ○ | BALANZA | Con precisión de 0.1 g |
| ○ | ALCOHOL | De 96° GL |
| ○ | OTROS | Espátula, pinzas, cerillos, morteros, guantes y equipo para limpieza |

b) Procedimiento

1. Determinar el peso del recipiente limpio y seco, además de identificarlo con número o marca.
2. Seleccionar 100 o 200 g de la muestra representativa y colocarlo en el recipiente, determinar

- el peso total.
3. Agregar 45 g de alcohol por cada 100 g de peso de material y mezclar por espacio de 1 minuto; encender la mezcla suelo húmedo-alcohol.
 4. Dejar enfriar la muestra por lo menos 5 minutos, puede colocarse en un recipiente con agua para que flote y se acelere el enfriamiento.
 5. Pesar nuevamente la cantidad de alcohol y verterlo.
 6. Repetir los pasos 3 y 4.
 7. Pesar la muestra y calcular el contenido de agua con la expresión (2.2).
 8. Si la diferencia de los contenidos de agua entre dos pesadas es mayor al 20% se deben repetir los pasos de 3 a 7.

c) Riesgos

El utilizar éste procedimiento de secado puede sobrecalentar la muestra produciendo la desaparición de elementos diferentes al agua, materia orgánica por ejemplo. En el inciso 4.4.3 se presentan resultados experimentales que se comparan con los obtenidos en el HC; dichos resultados demuestran que existe una relación lineal entre ellos y que el tiempo requerido para el secado de las muestras es menor a una hora.

2.2.4.2 Basado en los cambios de su densidad

Se basa en el trabajo presentado por *Bouyoucos (1928)* [citado por *Saborío Zárate, (1964)*] partiendo de la propiedad que tiene el alcohol puede entrar en íntima solución con el agua.

Por lo anterior, si se disgrega completamente un suelo húmedo con un volumen de alcohol conocido, la cantidad de agua presente en la muestra se incorporará al alcohol modificando su densidad, dependiendo de la densidad inicial del alcohol y de la cantidad de agua incorporada.

La densidad de la mezcla de *agua-alcohol*, producto de la filtración del conjunto *suelo-agua-alcohol*, es posible calibrarla con el contenido de agua determinado en el HC. Para éste se requiere conocer las características del alcohol y un volumen fijo, además de un peso húmedo conocido.

Con un densímetro es posible medir la densidad de la mezcla *agua-alcohol*, tomando en cuenta que cambia con la temperatura de la mezcla, y poder construir curvas como las mostradas en la Fig 2.2 y Fig 2.3 en las cuales el peso húmedo constante es de 100 g, con diferentes contenidos de agua (de 5 a 40%) y 250 ml de alcohol de 96° C GL para formar la mezcla *suelo-agua-alcohol*. Las lecturas tomadas en el densímetro fueron entre 17.5 y 35° C, a cada 2.5° C.

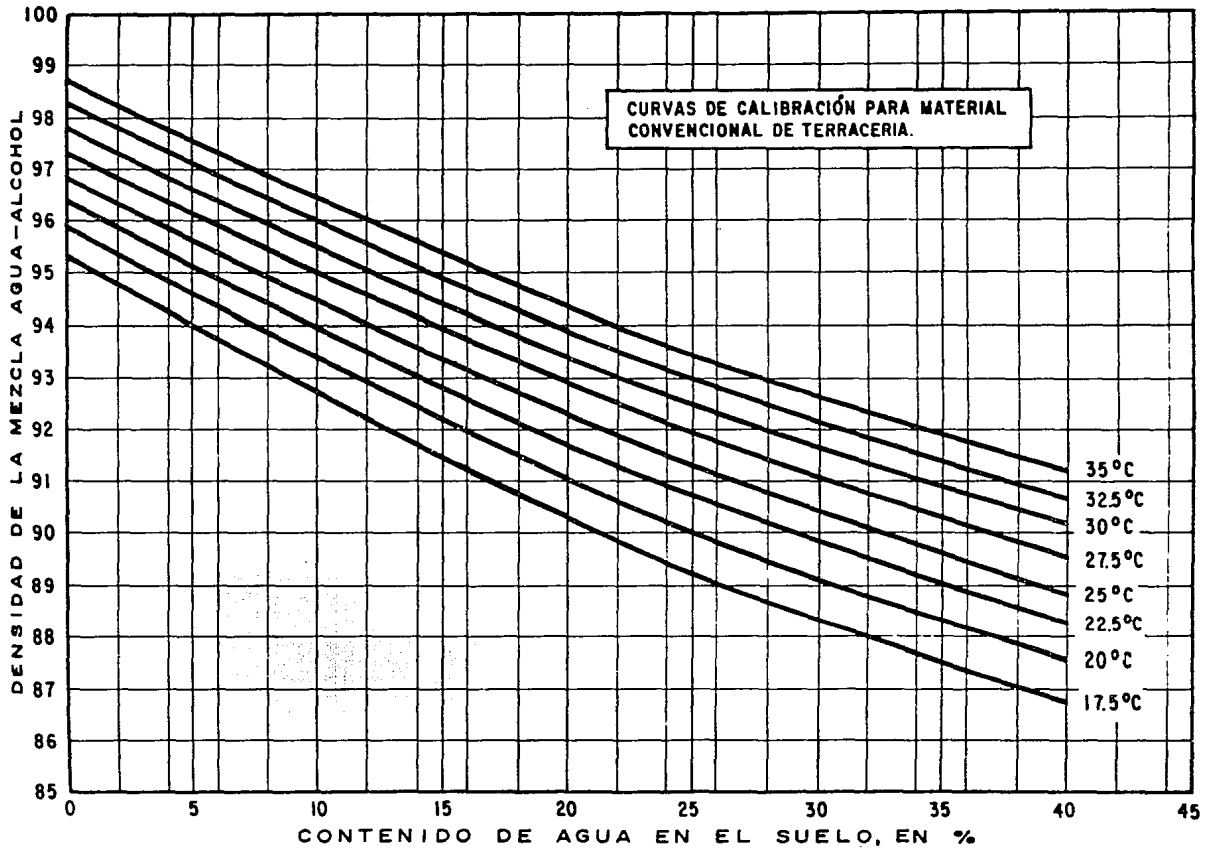


Fig 2.2 Curvas para determinar el contenido de agua por medio del cambio de la densidad del alcohol (*Saborío y Zárate, 1964*)

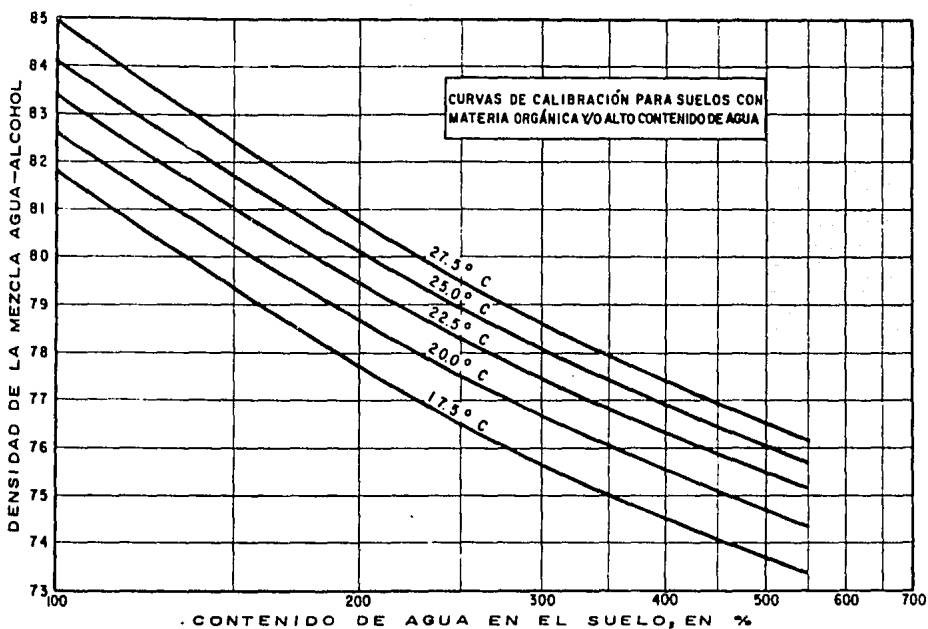


Fig 2.3 Curvas para determinar el contenido de agua para suelos con materia orgánica y/o alto contenido de agua por medio del cambio de la densidad del alcohol (Saborio y Zárate, 1964)

a) Equipo

- Alcoholímetro Gay-Lussac de 90° a 100 a 20° C
- Alcoholímetro Gay-Lussac de 80° a 90 a 20° C
- Alcoholímetro Gay-Lussac de 0° a 100 a 20° C
- Alcohol de 96° GL
- Termómetro de mercurio con graduación hasta a 50° C
- Papel filtro
- Agitador de vidrio
- Probeta de 500 ml
- Probeta de 250 ml
- Frascos de conserva
- Balanza de 0.1 g de precisión
- Malla No. 4
- Otros: charolas, cincel, franclas, etc.

b) Procedimiento

Es indispensable tener en campo o en laboratorio las Figs 2.2 y 2.3.

1. Del material que se toma para el control de compactación o del lugar que se requiere determinar su contenido de agua para 100 g.
2. Vaciar en el frasco de conserva que ya contenga 250 ml de alcohol normalizado a la temperatura ambiente.
3. Tapar el frasco herméticamente y agitar vigorosamente por espacio de 3 a 8 minutos con objeto de conseguir una completa incorporación del agua de la muestra con el alcohol.
4. Dejar reposar el frasco que contiene la mezcla suelo-alcohol por un lapso de 3 minutos y filtrar el líquido a través del papel filtro sobre una probeta de 500 ml hasta tener el volumen suficiente para que flote el densímetro.
5. Leer la densidad y temperatura del líquido filtrado y hacer uso de la Fig 2.2 o 2.3 para obtener finalmente el contenido de agua.

2.2.5 Basado en el cambio volumétrico

Cuando un peso dado de suelo húmedo se disgrega en un volumen de agua determinado, se tendrá un incremento de volumen ΔV que representa el volumen de sólidos y agua que contenía el suelo, considerando se le haya eliminado el aire. Si se conoce la densidad de sólidos, G_s , y la temperatura de la mezcla suelo-agua, se tienen los datos suficientes para determinar el contenido de agua del suelo introducido, haciendo el siguiente análisis:

$$\Delta V = V_w + V_s = \frac{W_w}{\gamma_o} + \frac{W_s}{\gamma_s} \quad (2.3)$$

de la expresión (2.2):

$$W_w = w W_s \quad (2.4)$$

y

$$W_s = \frac{W_{sh}}{1 + w} \quad (2.5)$$

sustituyendo (2.4) y (2.5) en (2.3), se tiene:

$$\Delta V = \frac{w W_s}{\gamma_o} + \frac{W_{sh}}{(1+w)\gamma_s} \quad (2.6)$$

$$\Delta V = \frac{1}{(1+w)\gamma_s} \left\{ \frac{w W_s}{\gamma_o} (1+w)\gamma_s + W_{sh} \right\} \quad (2.7)$$

$$w = \frac{W_{sh} - \Delta V \gamma_s}{\Delta V \gamma_s - W_{sh} \frac{\gamma_s}{\gamma_o}} \quad (2.8)$$

$$w = \frac{W_{sh} - \Delta V \gamma_s}{\left\{ \Delta V - \frac{W_{sh}}{\gamma_o} \right\} \gamma_s} \quad (2.9)$$

se sabe que:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_o} \quad ; \quad \gamma_s = G_s \gamma_o \quad (2.10)$$

entonces (2.9) finalmente resulta:

$$w (\%) = \frac{W_{sh} - \Delta V G_s \gamma_o}{\Delta V G_s \gamma_o - W_{sh} G_s} \times 100 \quad (2.11)$$

donde

- w (%) contenido de agua, en %
- ΔV incremento de volumen, cm^3
- G_s densidad de sólidos
- V_w volumen de agua, cm^3
- V_s volumen de sólidos, cm^3
- γ_o peso específico del agua, g/cm^3
- γ_s peso específico de sólidos, g/cm^3
- W_w peso de agua, g

- W_s peso de sólidos, g
 W_{sh} peso del suelo húmedo, g

La expresión (2.11) permite calcular el contenido de agua en términos de cantidades conocidas, G_s debe determinarse previamente para aplicar el método. Pueden formarse diferentes curvas, con la expresión (2.11), variando ΔV acordes al contenido de agua que pueda esperarse para un peso húmedo de la muestra con su respectivo G_s . Las Figuras 2.4, 2.5 y 2.6 muestran curvas con diferentes G_s para pesos de material húmedo de 100 y 250 g.

a) Equipo

- Probeta de 1000 ml
- Probeta de 500 ml
- Probeta de 100 ml
- Frasco Chapman
- Matraz de 1000 ml
- Malla número 4
- Cubeta
- Alcohol
- Otros: cincel, charolas, franclas

b) Procedimiento

Las siguientes operaciones se harán a la sombra, para evitar la evaporación del agua contenida en las muestras.

1. Del material proveniente de las muestras de compactación se toman 100 o 250 g que pase la malla número 4.
2. Verter el material dentro del matraz de 500 ml el cual deberá contener de 150 a 200 ml de agua.
3. Se agita el matraz que contiene el material vigorosamente para eliminar el aire que pueda estar atrapado.
4. Se vierte un resto de agua hasta completar 300 ml teniendo cuidado que cuando se introduzca no quede material adherido a las paredes del matraz.
5. Se mide el incremento de volumen y con ayuda de las Figuras 2.4 y 2.5 o de la ecuación (2.11) se calcula el contenido de agua.

METODO VOLUMETRICO
PESO DEL MATERIAL HUMEDO: 100 g

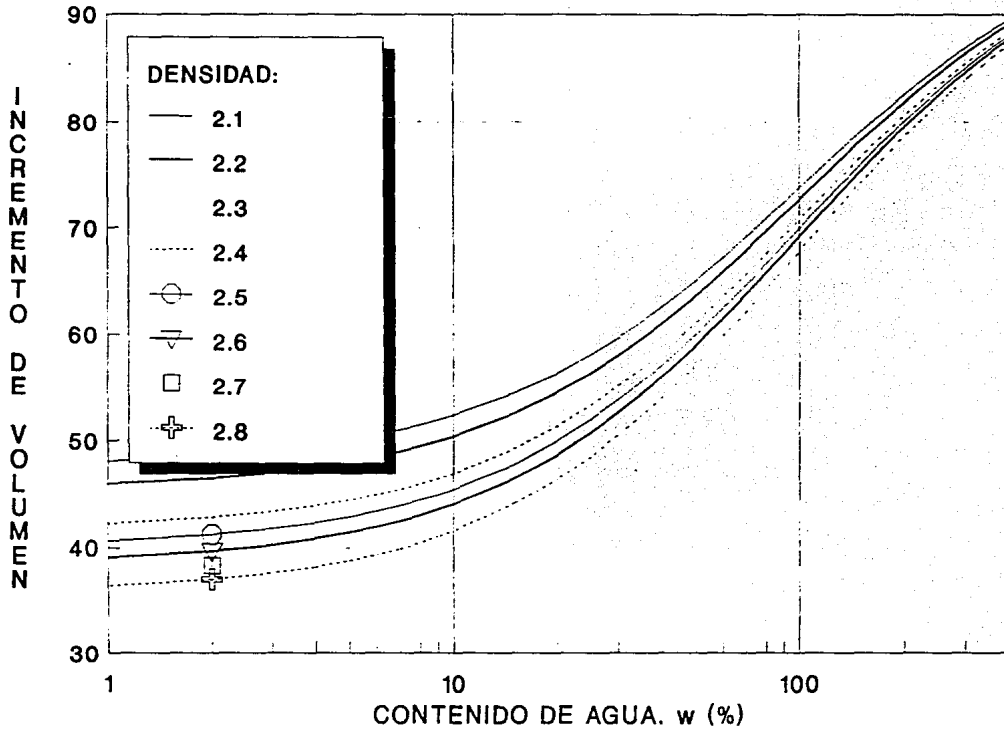


Fig 2.4 Curvas para determinar el contenido de agua para diferentes G_s por medio del cambio de volumen para un peso húmedo de 100 g

METODO VOLUMETRICO
PESO DEL MATERIAL HUMEDO: 250 g

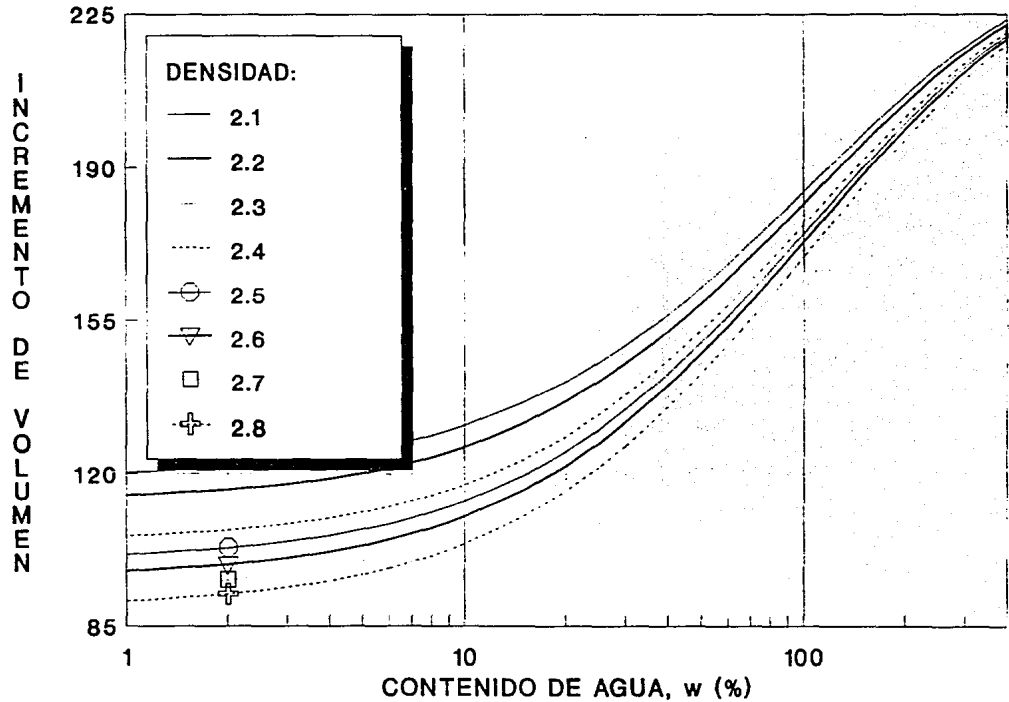


Fig 2.5 Curvas para determinar el contenido de agua para diferentes G_s , por medio del cambio de volumen para un peso húmedo de 250 g

METODO VOLUMETRICO
PESO DEL MATERIAL HUMEDO: 250 g

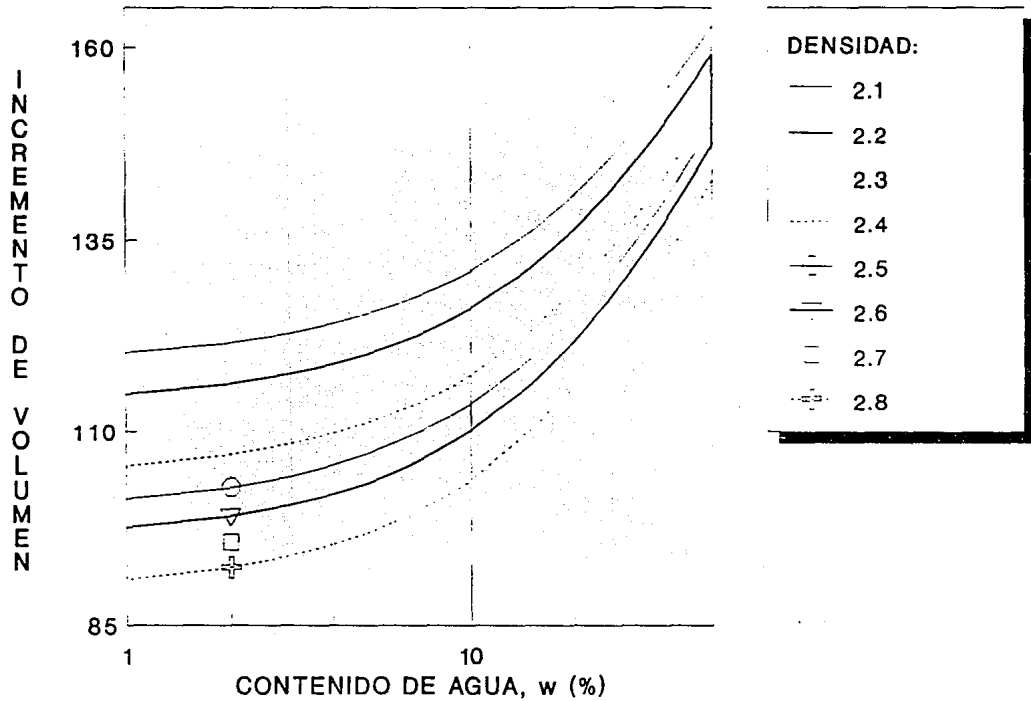


Fig 2.6 Curvas para determinar el contenido de agua para diferentes G, por medio del cambio de volumen para un peso húmedo de 250 g

2.2.6 Por medio de rayos infrarrojos

Saborío y Zárate (1964) mencionan que el peso seco de un suelo puede obtenerse haciendo uso de una balanza equipada con una fuente de luz infrarroja; este equipo es usado en laboratorios de química para obtener la humedad en harinas o leche en polvo. Hacen hincapié que debido a su uso y particular cuidado del equipo, la técnica no es apropiada para uso en campo. La cantidad de suelo que puede ser colocado es de 25 g.

En la misma referencia se menciona que las diferencias en contenido de agua no van más allá de $\pm 0.5\%$ con respecto al obtenido en el HC. El tiempo que se requiere para secar a la muestra puede variar entre 15 y 30 minutos.

2.2.7 Técnica del tolueno

Ellstein (1982) presenta la aplicación de un procedimiento usado en la industria química como una alternativa para el secado de suelos; dicho procedimiento tiene por objeto el determinar la humedad de materiales granulares y en polvo (talco).

El método consiste en colocar en un matraz el suelo y añadir tolueno, que es un reactivo, para que después al calentar al matraz por medio de una estufa el tolueno entre en ebullición. El vapor que se desprende es una mezcla de vapor de agua y de tolueno que al pasar por un refrigerante se condensan y se separan por tener diferente densidad. La separación de ambos líquidos se puede realizar colocando una trampa de destilación. El volumen de agua condensado en el recipiente de la trampa puede entonces medirse directamente en el sistema de graduación. La trampa de destilación utilizada por *Ellstein* tiene una capacidad de 10 ml lo que obliga a que la cantidad de agua contenida en la muestra de suelo por ensayar sea menor de 10 g. El diagrama del equipo se presenta en la Fig 2.7.

a) Equipo

El equipo utilizado en la referencia anterior es el siguiente:

- Balanza con precisión de 0.1 g
- Destilador, con trampa graduada de 10 ml
- Matraz redondo de base plana con capacidad de 500 ml
- Parrilla eléctrica de 1200 W
- Base para montaje del aparato
- Mangueras de latex para circulación del agua de enfriamiento
- Tolueno químicamente puro (grado reactivo)
- Embudo
- Malla asbestada
- Vaso de precipitado de 500 ml
- Papel aluminio
- Guantes
- Alcohol de 96° GL

○ Reloj con alarma

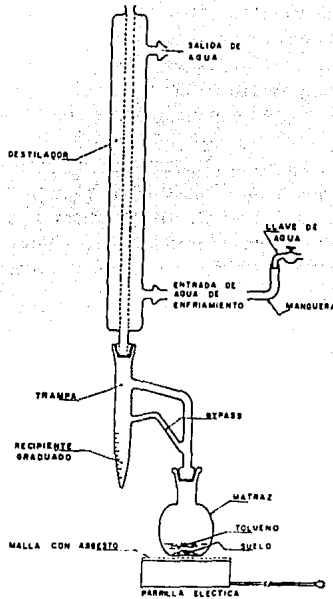


Fig 2.7 Diagrama del equipo utilizado en la técnica del tolueno (*Ellstein, 1982*)

b) Procedimiento

El procedimiento descrito por *Ellstein* es el siguiente:

1. Se estima el contenido de agua que probablemente el suelo tenga y se calcula el peso de suelo húmedo con la expresión siguiente:

$$W_{sh} = \frac{800}{w_e} + 8 \quad (2.12)$$

donde

w_e contenido de agua estimado, en %
 W_{sh} peso de suelo húmedo por ensayar, en g

2. El suelo húmedo se introduce en el matraz. Cuando el suelo tiene una consistencia viscosa o líquida se puede hacer un *taco* de suelo con papel aluminio para evitar que se pierda el material y sea más fácil de introducirlo al matraz.
3. Permitir la circulación del agua por el destilador.
4. Agregar tolueno suficiente para mantener un tirante sobre la muestra, incluso cuando una parte del tolueno esté en forma de vapor y en proceso de condensación.
5. Después de haber montado el equipo como lo indica la Fig 2.7 se enciende la parrilla para que el tolueno contenido dentro del matraz empiece a ebullición junto con el agua contenida en el suelo. La prueba termina cuando cesa el goteo de agua o a los 30 minutos de ebullición.
6. Cuando se considera que la prueba ha terminado se apaga la parrilla y se desmonta la trampa para introducirla en el vaso de precipitado con agua fría hasta que alcance la temperatura de calibración de 20 °C. La lectura del volumen de agua condensado en el recipiente de la trampa será medida a la tangente del menisco, con aproximación a 0.1 ml.
7. El cálculo del contenido de agua se realiza con la siguiente expresión:

$$w (\%) = \frac{V_w}{W_h - V_w} \quad (2.13)$$

donde

$w (\%)$ contenido de agua, en %
 V_w volumen del agua condensada en la trampa, en ml
 W_h peso del espécimen húmedo, en g

8. El tolueno puede ser recuperado y ser útil en otros ensayos. En la limpieza del matraz puede utilizarse alcohol.

En el capítulo 4 se expone una investigación de esta técnica utilizando suelos representativos de la carta de plásticidad, con algunas variantes en el procedimiento. Los resultados indican que es factible utilizar esta técnica en suelos altamente plásticos, el tiempo que se requiere generalmente es menor a una hora y los contenidos de agua obtenidos son correlacionados linealmente con los determinados en el HC.

2.2.8 Técnica de secado en el horno de microondas (HMO)

2.2.8.1 Calentamiento por microondas

Algunas sustancias presentan moléculas denominadas *moléculas polares* o *dipolos*. En ellas el centro de las cargas positivas no coinciden con el centro de las cargas negativas. Aquellas sustancias cuyas moléculas poseen cargas eléctricas distribuidas en forma simétrica se les llama *apolares*. Las moléculas del agua son dipolos.

El calentamiento con microondas se debe al continuo movimiento molecular provocado por la acción de un campo eléctrico (*polarización*) alternante. Si el campo eléctrico cambia

constantemente de polaridad, los dipolos cambian de posición intentando acompañar las modificaciones del campo y, en consecuencia, producen calor. Cuanto mayor es la capacidad de los materiales a cambiar su polaridad, mayor es su *constante dieléctrica*. El agua favorablemente tiene una constante dieléctrica relativamente alta, en comparación a otras moléculas, y por la generación del campo eléctrico externo, el agua se calentará mucho más rápido que otros cuerpos que tengan una constante dieléctrica menor.

En el caso del horno de microondas casero el campo eléctrico es generado por una radiación electromagnética de microondas que cambia constantemente de polaridad, con frecuencias de poco más de 2000 MHz. El calentamiento de los materiales depende de la capacidad de respuesta a los campos eléctricos, ésto es, los materiales se pueden clasificar como *absorvedores* (agua, por ejemplo), *reflectores* (metales), o *transmisores* (vidrio, loza, papel, plásticos), de microondas, respectivamente. En el horno de microondas, debe existir en su interior materiales que absorban la energía irradiada, de no ser así, se puede causar daños al magnetrón (*generador del campo eléctrico*), ni tampoco debe introducirse objetos metálicos por ser reflectores de microondas.

Puschner (1966) presenta una ecuación que relaciona la energía disponible para el calentamiento por unidad de volumen en función de la frecuencia y del cuadrado de la resistencia del campo.

$$p = 2 \pi f E^2 \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta \quad (2.14)$$

donde

p = energía convertida en calor por unidad de volumen, W/cm³

f = frecuencia de microondas, Hz

E = resistencia del campo eléctrico, V/cm

ϵ_0 = constante dieléctrica en el vacío
= 0.8854×10^{-13} F/cm, ó (W s/V²)/cm

ϵ_r = constante dieléctrica relativa del material calentado (respecto a la del vacío)

$\tan \delta$ = factor de pérdida del material (*usualmente del orden de 0.2*)

La profundidad de penetración de las microondas electromagnéticas disminuye grandemente cuando se incrementa la frecuencia, y si el calentamiento es con un campo muy fuerte causa descargas. Entonces, se requiere un balance óptimo de estas dos variables para que el calentamiento sea más eficiente del material de interés. En el caso del agua, la frecuencia óptima es de 2450 MHz y valores de E entre 10 y 100 V/cm.

2.2.8.2 Secado de suelos con microondas

Los antecedentes del uso del horno de microondas para el secado de los suelos son varios [*Lade & Nejadi-Babadai (1976)*, *Charlie et al (1982)*, *Gilbert, P.A. (1991)*, *Mendoza (1991)*, entre otros].

El agua tiene una constante dieléctrica entre 88 (a 0° C) y 55.3 (a 100° C), valores relativamente altos en comparación con la de los materiales que forman la fase sólida del suelo, menor de cuatro.

En el caso de un material arcilloso su constante dieléctrica para temperaturas mayores a 100° C es menor a 10. Favorablemente en los suelos que se secan en un horno de microondas, de los que comúnmente se usa en cocina, el agua se calienta más rápido que su fase sólida. *Charlie, et al (1982)* presenta determinaciones hechas sobre diferentes suelos húmedos secados en el horno de microondas con energía máxima y continua, en donde el agua correspondiente a cada suelo se calienta rápidamente y alcanza su punto de ebullición manteniéndose hasta que ésta se evapora, Fig 2.8.

TEMPERATURA VS TIEMPO EN HORNO DE MICROONDAS

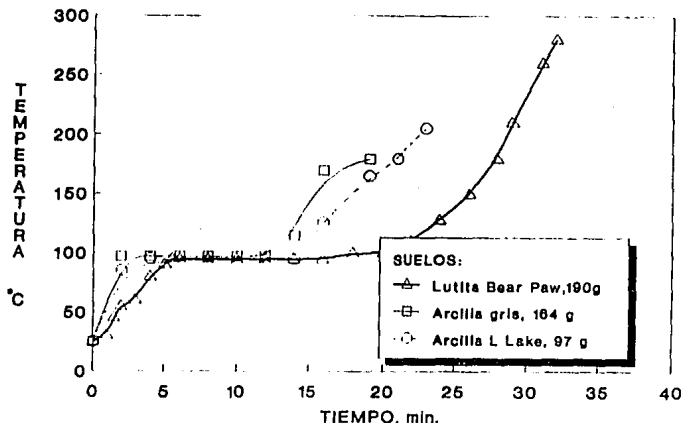


Fig 2.8. Variación de la temperatura con el tiempo, de diversos suelos con el HMO (*Charlie, et al, 1982*)

En la Fig 2.8 se aprecia que transcurrido un cierto tiempo, y en función del tipo de suelo y cantidad de agua que contenga, la temperatura puede alcanzar valores hasta de tres veces la de ebullición del agua; provocando así, que se remueva no sólo agua libre. El sobrecalentamiento del material es la mayor limitación que se tiene en un HMO, dado que cuando se hace operar por más tiempo del necesario, la temperatura se eleva demasiado con respecto a la estandarizada, y que provoca que se remueva tanto agua libre como parte de la adsorbida. *Lambe (1949)* advierte que cuando se aumenta la temperatura se obtienen contenidos de agua más altos, Fig 2.9, como resultado de la remoción parcial de la capa adsorbida a la superficie de las placas arcillosas que constituyen la fase sólida. Se tiene entonces que la definición de *peso seco* es arbitraria; se considera que el peso seco estándar corresponde a la suma del peso de los minerales más el del agua adsorbida que no se remueve por calentamiento a la temperatura estándar. El agua adsorbida en las arenas es generalmente despreciable, atendiendo a la superficie que dichos granos o gravas tienen por unidad de peso (superficie específica), con respecto a la que poseen las partículas arcillosas. En la Fig 2.9 se tiene que el contenido de agua de la arena de Ottawa no sufre grandes cambios, aun para temperaturas mayores a la estándar.

CURVAS DE SECADO EN HORNO DE CONVECCION

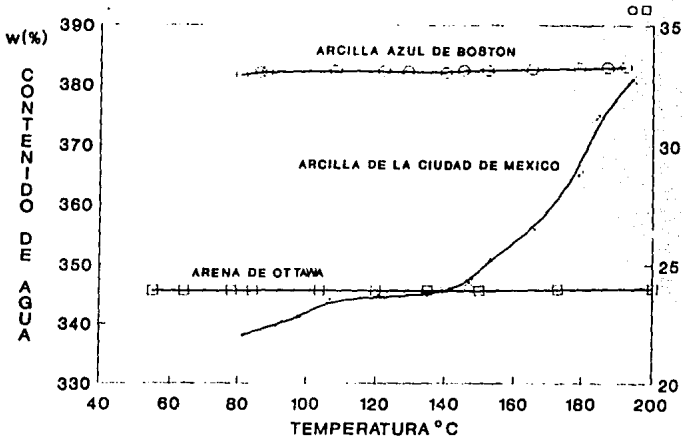


Fig 2.9. Variación del contenido de agua con la temperatura de diversos suelos en el HC (Lambe, 1949)

En caso de que el calentamiento se prosiguiera en suelos arcillosos (a partir de 400° C ó 500° C), se eliminaría agua adsorbida que forma parte de la fase sólida de los minerales arcillosos, Fig 2.10, y que se presenta en forma de hidroxilos en su composición molecular.

Como opción para evitar el sobrecalentamiento de los suelos o de la elevación de la temperatura, se pueden utilizar hornos de microondas que tienen capacidad de condicionar su tiempo de encendido, por medio de un sensor de temperatura (*probe*), en función de la temperatura que alcance el suelo en el interior del HMO. Una segunda opción es de que en el HMO se monitoree en forma constante la variación del peso del suelo y se detenga precisamente cuando se alcance peso constante durante cierto tiempo; un equipo sofisticado lo describe Gilbert (1991).

En el caso del HMO el tiempo necesario para secar un suelo está influenciado por:

- ▶ Cantidad de agua por evaporar, que a su vez es función del peso total del suelo por secar y de su contenido de agua,
- ▶ Mineralogía del suelo,
- ▶ Características del horno,
- ▶ Características de los recipientes que contengan al suelo,

CURVAS DE DESHIDRATACION PARA DIFERENTES MINERALES

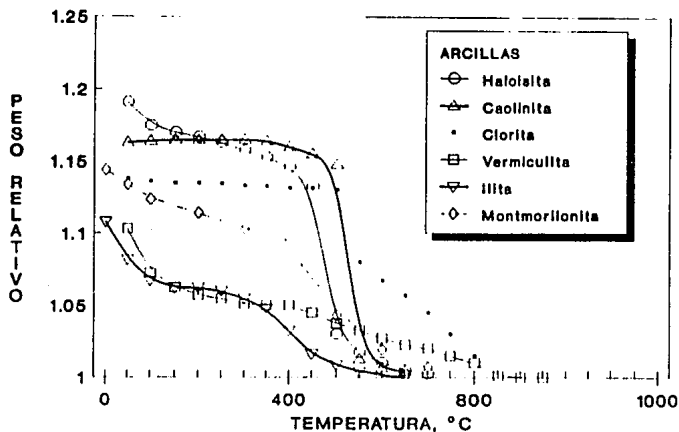


Fig 2.10. Curvas de deshidratación para diferentes minerales (*Grim, 1968*)

- ▷ Criterio para definir *peso seco constante*, y
- ▷ Precisión de la Balanza con que se defina el *peso seco*.

Gilbert (1974), citado por *Charlie, et al (1982)*, obtuvo la ecuación siguiente que predice el tiempo requerido para que un HMO aporte la energía suficiente para calentar una cierta masa de suelo de la temperatura ambiente a la de ebullición del agua y se evapore:

$$t = 4.189 M \{(0.2/w + 1)(100 - T_0) + 539\}/P \quad (2.15)$$

donde

- t = tiempo total requerido por el secado, s
- M = masa de agua, g
- T₀ = temperatura inicial del suelo, °C
- P = energía útil (adsorbida), W
- 4.189 W/cal = constante

La ecuación (2.15) considera que el punto de ebullición del agua es de 100° C, y que el calor específico del suelo seco es de 0.2 cal/g °C. De la misma ecuación solamente es necesario conocer la energía adsorbida, por estimación de la ecuación (2.14) o mediante determinaciones

experimentales de la relación entre la energía aplicada vs la masa de agua, si es que se desconocen las características técnicas del horno. La curva de calibración experimental teórica de energía está expresada con la siguiente ecuación:

$$P = \frac{M \Delta T c_w}{t} \quad (2.16)$$

donde

P = energía adsorbida útil, W

M = masa de agua calentada, g

ΔT = cambio de la temperatura ambiente a la de ebullición, °C

t = tiempo durante ΔT

c_w = calor específico del agua = 1 cal/g °C

4.189 W s/cal = constante de proporcionalidad

El uso de la ecuación (2.15) para estimar el tiempo necesario para secar un suelo, requiere conocer el contenido de agua que es lo que precisamente se desea determinar; sin embargo, una estimación de éste permitiría en principio tener una idea del tiempo requerido.

La norma señala que el uso del HMO es aplicable a la mayoría de los suelos *pero no sustituye a la tradicional ASTM D2216-90*. El secado de suelos consiste en que se coloque en un recipiente adecuado e introducirlo en el HMO para que sea secado en intervalos de tiempo, de tal forma que pierda agua, al finalizar cada intervalo la muestra debe ser pesada y observar el cambio de peso, la prueba termina cuando el peso es constante. El HMO puede ser utilizado tanto en laboratorio como en campo.

a) Equipo

- Balanzas
 - Con precisión de 0.01 g para especímenes de 200 g o menos
 - Con precisión de 0.1 g para especímenes de peso comprendido entre 200 y 1000 g
 - Para pesos mayores a 1000 g se utiliza una balanza con precisión de 1 g
- Horno de microondas tipo casero
- Recipientes no metálicos, resistentes a cambios de peso o forma cuando sean sujetos a calor repetido, enfriamiento o limpieza. Se prefiere que sean de porcelana o vidrio.
- Guantes para manejar los recipientes calientes

b) Procedimiento

1. Determinar el peso del recipiente limpio y seco.
2. Colocar en el recipiente la muestra representativa e inmediatamente determinar su peso.
3. Colocar el recipiente en el HMO y encender por espacio de 3 minutos.
4. Después de que el tiempo ha terminado, sacar el recipiente del HMO y dejarlo enfriar para poder manejarlo. Determinar su peso.

5. Con una pequeña espátula o cuchilla mezclar cuidadosamente el suelo, teniendo especial cuidado de no perder suelo.
6. Colocar nuevamente el recipiente dentro del horno y encenderlo por 1 minuto.
7. Repetir 4 a 6 hasta que el cambio entre dos determinaciones de peso consecutivas sea poco significativa en el cálculo del contenido de agua.
8. Se usa el último peso del recipiente con el suelo para determinar el contenido de agua, de acuerdo con la expresión (2.2).

En el capítulo 4 se correlaciona en forma experimental la técnica del HMO con la del HC con resultados que alientan a usar esta técnica en forma cotidiana. Pueden verse en los capítulos 5 a 7 las determinaciones del contenido de agua con cantidades de suelo pequeñas.

2.2.9 Técnica que usa aparatos nucleares

Con el uso de este tipo de aparatos es posible estimar el contenido de agua y el peso volumétrico en campo en un tiempo relativamente corto, de 10 a 15 minutos, a determinadas profundidades. La ASTM ha estandarizado el método bajo la designación D3017 (*ASTM D3017-88, 1991*).

a) Medida de la humedad en el lugar

Los aparatos diseñados para medir la humedad *in situ* tienen una fuente emisora que proyecta neutrones rápidos o también llamados de alta energía, y que la pierden cuando penetran en el suelo al momento de chocar con los núcleos de átomos pesados o con núcleos de átomos de hidrógeno; como los átomos de hidrógeno son mucho más ligeros, de masa comparable a la de los neutrones rápidos, éstos perderán en estos últimos choques mucha más energía que cuando chocan con átomos mucho más pesados (pierden cerca de la mitad de su energía en cada choque contra un átomo de hidrógeno). En la superficie del suelo se tiene un receptor para que recoja y registre los átomos lentos (de baja energía) que son los que chocan con los átomos de hidrógeno; los conteos registrados de estos últimos serán proporcionales al contenido de hidrógeno del material y considerando que el contenido de agua es proporcional al contenido de hidrógeno, puede establecerse una correlación (*Saborio y Zárate, 1964*).

b) Equipo

Consta de tres aparatos que forman el equipo suficiente para detectar la humedad:

- Contador eléctrico portátil, Figuras 2.11 y 2.12
- Medidor de humedad, Figuras 2.13 y 2.14
- Medidor de peso volumétrico, Figuras 2.15 y 2.16

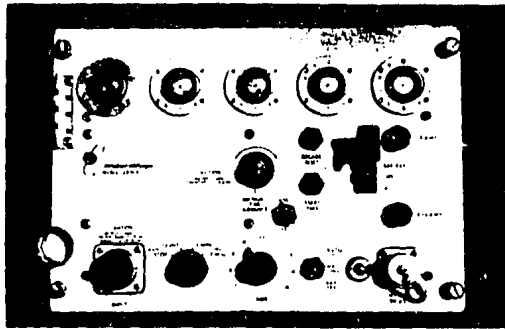
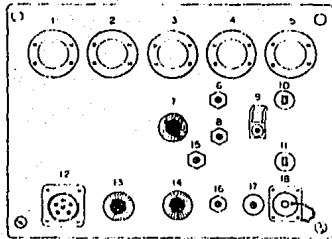


Fig 2.11 Contador eléctrico portátil (Saborío y Zárate, 1964)



- 1 a 5 Indicadores de lectura
- 6 Botón para borrar lecturas y poner ceros
- 7 Contador automático o reloj
- 8 Switch de encendido
- 9 Batería
- 10 y 11 Fusibles
- 12 Enchufe para las cápsulas
- 13 Control de tiempo, para uno y dos minutos
- 14 Voltaje 9.30 densidad 11.65 humedad
- 15 Para uso y prueba
- 16 Arriba: Cargar la batería Medio: Trabajar Abajo: Probar la batería
- 17 Foco para probar la batería
- 18 Contacto

Fig 2.12 Descripción del contador nuclear portátil (Saborío y Zárate, 1964)

Fig 2.13 Aparato nuclear para medir el contenido de agua (Saborío y Zárate, 1964)

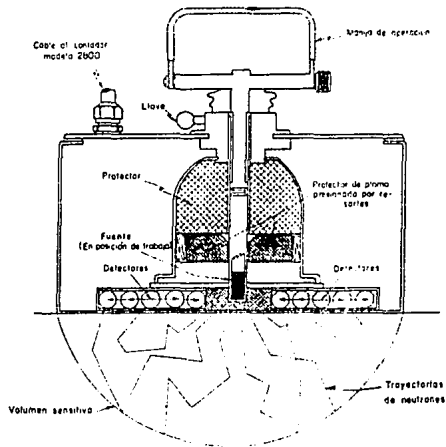
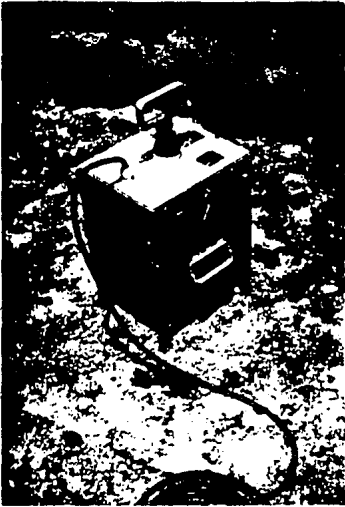


Fig 2.14 Diagrama del aparato nuclear para determinar el contenido de agua (Saborío y Zárate, 1964)

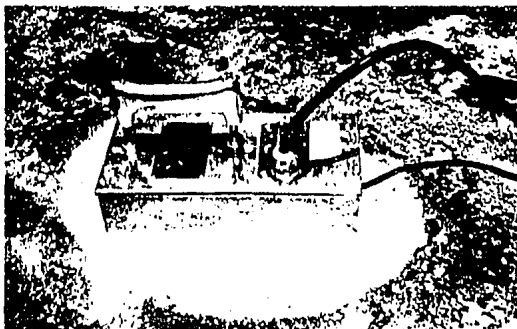


Fig 2.15 Aparato nuclear para medir el peso volumétrico
(Saborio y Zárate, 1964)

SECCION TRANSVERSAL DEL MODELO P-22
PARA DETERMINAR EL PESO VOLUMETRICO
SUPERFICIAL

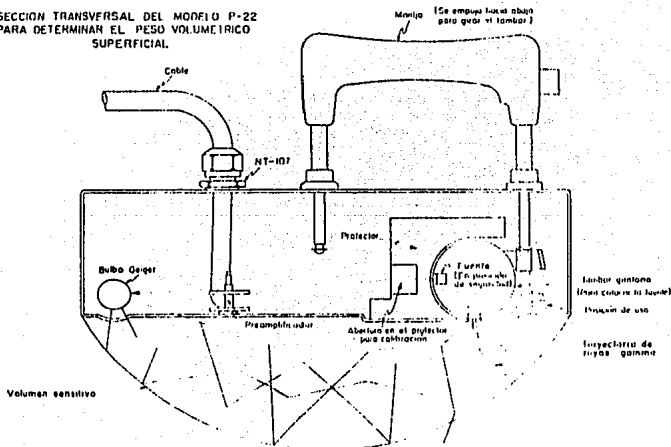


Fig 2.16 Diagrama del aparato nuclear para determinar el peso volumétrico
(Saborio y Zárate, 1964)

c) Comentarios acerca de las ventajas y desventajas de su uso

- ▶ La ventaja principal del uso de estos aparatos: es de medir el contenido de agua del suelo *in situ* en un tiempo corto, de 10 a 15 minutos, en comparación al requerido con la técnica tradicional.
- ▶ Permite no destruir el suelo o extraerlo, de los pavimentos, por ejemplo.
- ▶ Se tiene un mejor control de un tramo determinado de terracerías, por el hecho de realizar un número mayor de pruebas que puedan hacerse con la tradicional, atendiendo al tiempo que se toma para presentar los resultados.

El uso de los aparatos adolece de lo siguiente:

- ▶ El costo de inversión es alto.
- ▶ Se debe tener una correlación para cada suelo.
- ▶ A temperaturas menores de 0° C, el equipo es afectado y como consecuencia el conteo que se registre es menor lo que provoca que los resultados sean falsos.
- ▶ Es necesario tener operadores entrenados en el manejo, funcionamiento y alcance del equipo.
- ▶ El relativo peligro que entraña el uso de materiales radiactivos.
- ▶ Las mediciones dependen de las propiedades físicas y químicas del suelo.

Los ingenieros *Saborío y Zárate (1964)* incluyen un análisis de costo, de aquéllos años, para demostrar que la desventaja del costo inicial es compensada con el tiempo que se economizaría con su uso. *Zazueta y Xiu (1992)* precisan ventajas y desventajas similares a las descritas.

3. TECNICAS PARA DETERMINAR EL LIMITE LIQUIDO

Albert Mauritz Atterberg (1911) investigó un gran número de arcillas con diferente contenido de agua para poder definir su consistencia y plasticidad; después de varios intentos para hacerlo, estableció las fronteras entre los diferentes estados que pueden tener los suelos, éstos son:

- ▷ Límite líquido (w_L)
- ▷ Límite plástico (w_P)
- ▷ Límite de contracción (w_S)
- ▷ Límite de cohesión
- ▷ Límite de pegajosidad

El primer límite es la frontera entre los estados líquido y plástico, el segundo entre el plástico y el semisólido y el tercero entre los estados semisólido y sólido. En conjunto los anteriores límites son llamados *límites de consistencia*. Los límites de cohesión y de pegajosidad tienen importancia para los ingenieros agrónomos, dado que indican la humedad en el que los grumos del suelo pueden pegarse entre sí y en las superficies metálicas como pueden ser las cuchillas de los arados del equipo para cultivo, respectivamente.

Cada uno de los límites anteriores es un *contenido de agua* y es calculado con la ecuación (2.1).

3.1 Técnica de la Copa de Casagrande

La prueba ideada por *Atterberg* para obtener el límite líquido es simple y también influenciada por

el operador y como consecuencia los resultados eran inconsistentes, incluso para un mismo material. En la prueba se debía de cerrar una ranura hecha en la muestra de suelo contenida en una cápsula por acción de 10 golpes ligeros, el suelo se encontraba en el límite líquido; es claro que el operador tenía que ajustar el contenido de agua por intento y error hasta alcanzar el requerido. A. *Casagrande* (1932) desarrolló un equipo partiendo de las ideas de *Atterberg* para determinar el límite líquido de una forma más consistente; la nueva técnica se difundió por todo el mundo y se tiene como una prueba estándar; se le conoce como la *prueba de la copa de Casagrande* haciendo alusión a la forma del equipo mismo. Las dimensiones del equipo y el procedimiento de la prueba están dados por la norma de la ASTM bajo la designación D4318-84, (*ASTM D4318-84*, 1991).

La prueba del límite líquido tal como se realiza actualmente, es realmente una prueba de corte dinámico. El propio *Casagrande* (1958) hace mención de diferencias encontradas en equipos con respecto al estandarizado; entre ellas, el material de la base, el peso de la copa, el tipo de ranurador, tipo de material con que esta hecha la copa, la altura de caída de la copa, entre otras. Propone sustituirla por una más simple y de corte directo, o una prueba de corte indirecto, ejemplificó la prueba de penetración estática, y así poder eliminar muchas de las dificultades que se tienen al usar la copa. Mencionaba que la técnica que pudiera desarrollarse debería de ser simple y de un bajo costo para poder competir con la ya entonces establecida.

En lo que sigue de este capítulo se presentan diferentes técnicas alternativas para determinar el límite líquido de los suelos, todas ellas basadas en el concepto de penetración. En el capítulo 5 de esta tesis se expone un trabajo experimental en donde se comparan dos técnicas alternativas a la copa para determinar el límite líquido de los suelos. Los resultados indican que se puede obtener dicho índice de los suelos de una forma mucho más fácil, rápida y con resultados totalmente correlacionados con los de la copa.

3.2 Conos penetrantes

El principio para todos los diferentes conos es muy simple: la penetración de un cono que al dejarlo libre de su apoyo o sujetador, inicialmente en estado de reposo y su punta tocando justamente la superficie enrasada del suelo, cae por su propio peso y penetra en la masa de suelo por ensayar.

El primer antecedente que se tiene de la técnica de cono es el **cono sueco** o **cono que cae** y que fue presentado en 1915 por *John Olsson* a la Comisión Geotécnica de los Ferrocarriles Estatales Suecos (*Bjerrum & Flodin*, 1960), y que en un principio se usó para la medición de la resistencia cortante, Fig 3.1. Dicho cono tenía un ángulo en su ápice de 60° y 60 g de peso, que con una profundidad de penetración en el suelo de 10 mm indicaba que el suelo se encontraba en el límite líquido. El trabajo iniciado por la Comisión tuvo por objeto la determinación de la penetración, para establecer dicha resistencia, de conos con diferentes pesos, de 10 a 1 000 gramos.

Independientemente de los estudios iniciados en Suecia, varios países comenzaron a experimentar con diferentes conos, entre ellos: Bulgaria, India, Estados Unidos y la entonces llamada URSS.

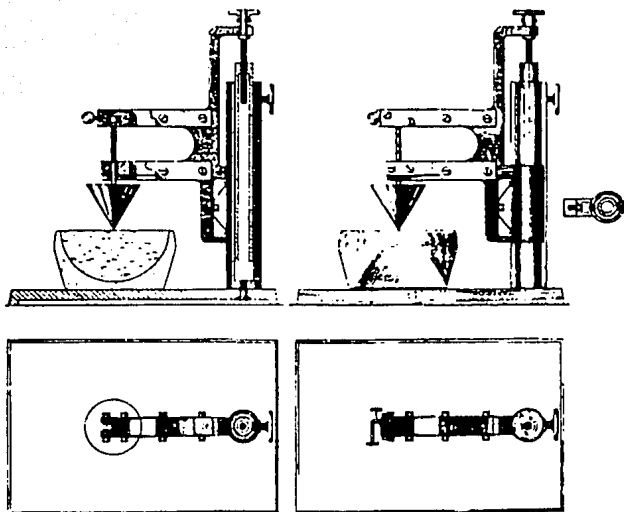


Fig 3.1 Primera versión del aparato del cono sueco para la determinación experimental del esfuerzo cortante en arcillas (mostrado por Wood, 1990)

3.2.1 Cono sueco

En la Fig 3.2 se muestran los diferentes aparatos que se usan comúnmente en Suecia y en los países escandinavos para determinar el límite líquido de los suelos, mismos que han sustituido a la copa de Casagrande, (Karlsson, 1981).

El aparato consta de un pedestal con un brazo ajustable verticalmente en donde el cono es colocado y que permite que éste justamente toque la superficie del suelo; la penetración del cono en la masa de suelo es posible medirla y apreciarla con una lupa, con una aproximación de 0.1 mm. El límite líquido se define como el contenido de agua que tiene el suelo cuando el cono penetra 10 mm. En general el aparato cuenta con cuatro conos diferentes; 400 g/30°, 100 g/30°, 60 g/60° y 10 g/60°. Aunque dentro del equipo del cono se dispone de estos conos, el cono que se usa para determinar el límite líquido es el de 60 g/60°. Durante la investigación para determinar la resistencia al esfuerzo cortante no drenada de las arcillas por parte de la Comisión, encontraron conveniente reducir el número de conos a un mínimo; los conos mencionados fueron los escogidos (Hansbo, 1957).

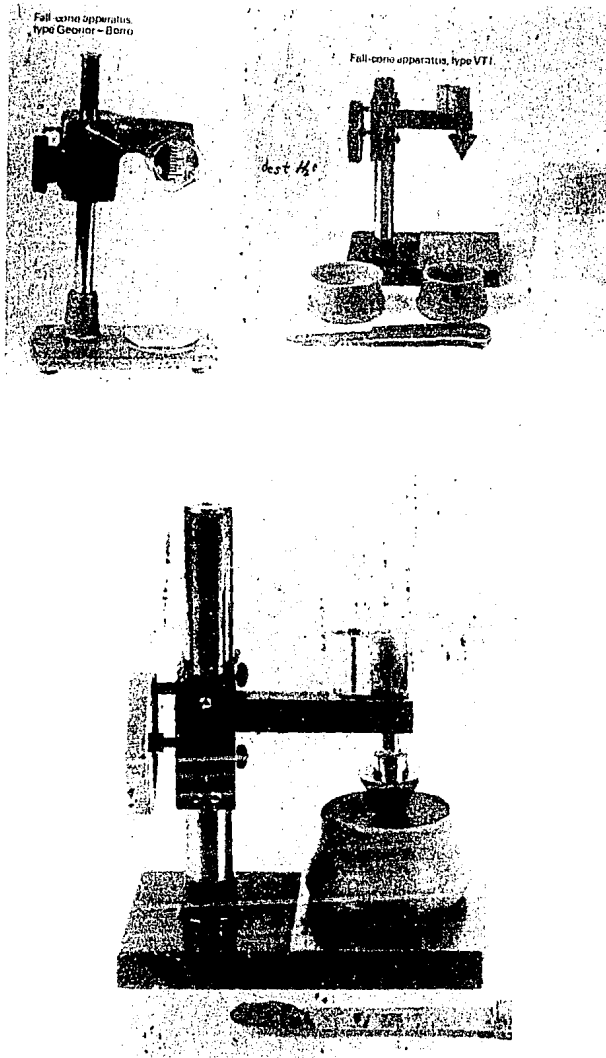


Fig 3.2 Aparatos de cono suco para determinar el límite líquido de suelos comúnmente usados en Suecia (*Karlsson, 1981*)

Correlaciones entre el cono inglés, cono succo y la copa de Casagrande se presentan en el capítulo 5, utilizando el HC y HMO. Se demuestra que dichas correlaciones son lineales con valores de coeficientes de correlación cercanos a la unidad

3.2.2 Cono de la URSS

En 1949 se hace la primera mención de una prueba estandarizada por *Vasilev*. El aparato de *Vasilev*, Fig 3.3, consiste de un cono de cobre con 30° en su punta y pesos que suman un total de 76 g en el punto inferior del cono. La muestra de suelo se coloca en una copa de 2.0 cm de profundidad con diámetro de 3.7 cm. El cono se coloca en la superficie enrasada del suelo y se deja penetrar lentamente. El límite líquido se define como el contenido de agua correspondiente a una penetración de 10 mm del cono.

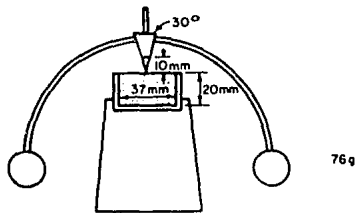


Fig 3.3 Cono de la URSS para determinar el límite líquido (mostrado por *Sowers*, 1959)

3.2.3 Cono del Instituto Tecnológico de Georgia (E.U.A.)

Experimentos realizados por el ITG para determinar el límite líquido en limos micaceos condujeron en 1951 a desarrollar un cono. El cono es de 75 g/ 30° y el límite líquido se obtiene cuando la penetración es de 10 mm. La muestra de suelo es colocada en una copa de 2.0 cm de profundidad y 4.0 cm de diámetro.

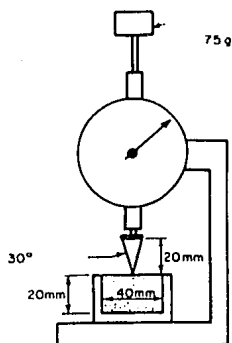


Fig 3.4 Cono del Instituto Tecnológico de Georgia (mostrado por Sowers, 1959)

3.2.4 Cono inglés

Investigaciones realizadas en Inglaterra demostraron que los resultados obtenidos con la copa de Casagrande adolecían de una variación significativa, aun los obtenidos para los mismos materiales y realizados en diferentes laboratorios. Como alternativa a la copa se adoptó un cono estándar de 30° en su ápice y 80 g de peso que se muestra en la Fig 3.5, (Sherwood & Ryley, 1970; BS 1975). La definición del límite líquido del suelo es entonces: el contenido de agua cuando la penetración del cono sea de 20 mm.

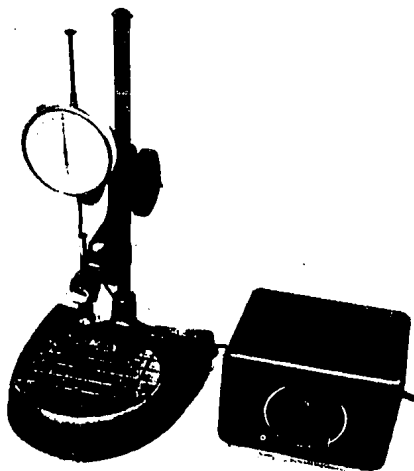


Fig 3.5 Cono inglés, 80 g/30° y penetración de 20 mm (Sherwood & Ryley, 1970)

3.2.5 Cono indio

Fue desarrollado por el *Indian Central Road Research Institute* en 1953 para sustituir a la prueba de la copa de Casagrande, Fig 3.6, y consiste de un cono de 31° en su ápice y 3.0 cm de alto con un peso total de 148 g, 148 g/ 31° . La muestra de suelo se coloca en un recipiente de 5.0 cm de profundidad y 5.0 cm de diámetro. La punta del cono es colocada justamente en la superficie enrasada del suelo y es dejado caer libremente; cuando el cono penetra 2.54 cm (1 in) se toma una porción del suelo para obtener su contenido de agua que será el límite líquido.

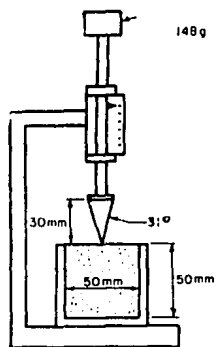


Fig 3.6 Cono usado en la India (mostrado por *Sowers, 1959*)

3.3 Curvas de fluidez

La curva que relaciona el logaritmo del número de golpes, para la copa de Casagrande, en las abscisas con el contenido de agua en las ordenadas se le llama *curva de fluidez* (Fig 3.7). En el caso de la prueba de cono se grafica el logaritmo de su indentación en milímetros, en vez del logaritmo del número de golpes, en la Fig 3.8 se muestra una gráfica típica de los resultados experimentales utilizando el cono sueco. La pendiente de la recta $\log N$ vs $w(\%)$ de la copa de Casagrande es negativa, a diferencia de ser positiva la pendiente de la recta $\log d$ vs $w(\%)$, ya que a mayor contenido de agua, mayor es la penetración.

LIMITE LIQUIDO
COPA DE CASAGRANDE
ARCILLA DE LA CIUDAD DE MEXICO
SECADO EN HC

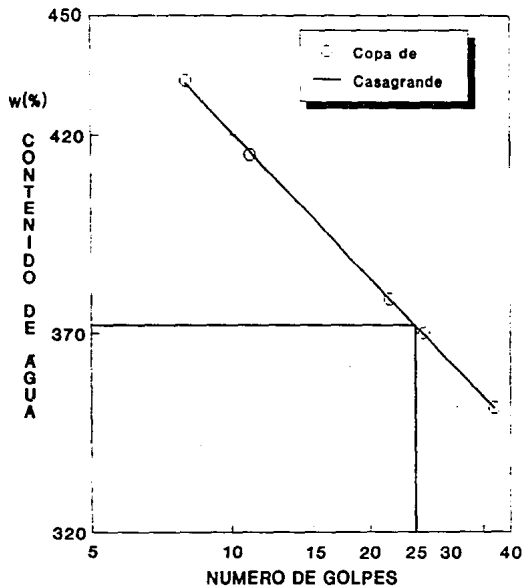


Fig 3.7 Curva de fluidez obtenida con la copa de Casagrande para un suelo arcilloso de la Ciudad de México

LIMITE LIQUIDO
CONO SUECO
ARCILLA DE LA CIUDAD DE MEXICO
SECADO EN HC

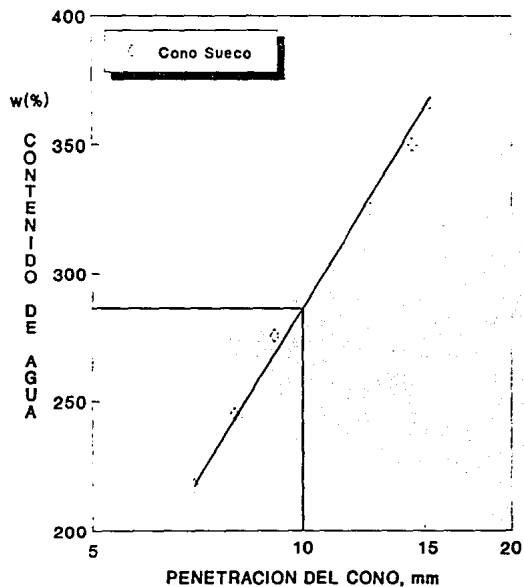


Fig 3.8 Curva de fluidez obtenida con el cono sueco para un suelo arcilloso de la Ciudad de México

3.4 Penetración de una barra de acero

Madinaveitia y Mendoza (1992) presentan un procedimiento alternativo a la copa de Casagrande para determinar el límite líquido de una forma *rudimentaria*. Este procedimiento reduce la exactitud de los resultados, con referencia a la prueba de la copa, pero consideran que la precisión del ensayo que se propone es suficiente para lo que se requiere en ese estudio. El estudio que presentan se centra en una investigación para determinar la calidad de tierras con fines de fabricación de adobes y tabiques en cualquier parte del país, sin equipo especializado ni personal experto.

Los autores señalan que la humedad del barro conveniente para moldear adobes y tabiques corresponde a su límite líquido. Consideran que un barro está en dicho límite cuando al colocar una barra de acero (aparentemente lisa y sin punta), de 1 cm de diámetro y 50 cm de largo, sobre su superficie y soltarla penetra en él aproximadamente 2 cm, Fig 3.9. La correlación entre la copa de Casagrande y el procedimiento descrito se presenta en la Fig 3.10.

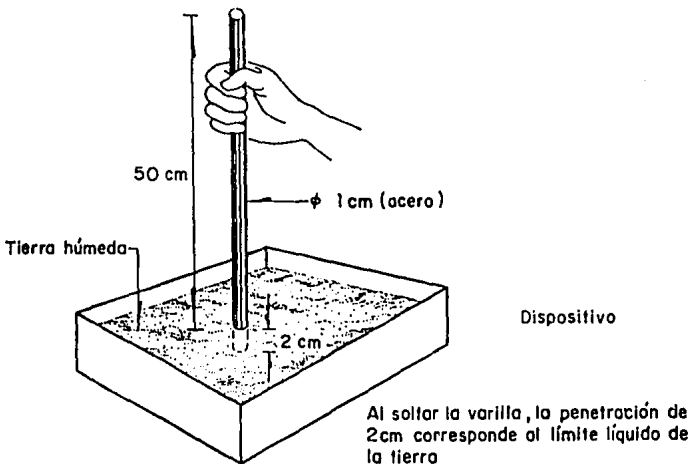


Fig 3.9 Procedimiento rudimentario propuesto por *Madinaveitia y Mendoza (1992)*

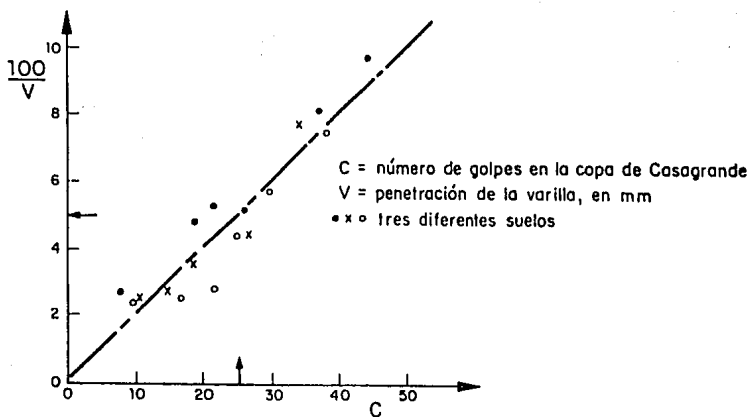


Fig 3.10 Límite líquido que se obtiene haciendo uso de la penetración de una varilla (Madinaveitia y Mendoza, 1992)

3.5 Correlaciones entre los conos penetrantes y la copa de Casagrande

Como se ha visto anteriormente varios tipos de conos penetrantes se usan en diferentes países como sustitución a la copa; en la Tabla 3.1 se resumen las características de los conos. Las diferencias entre los pesos y ángulos hacen que se tengan diferentes definiciones del límite líquido, lo que posiblemente dificultará para que se adopte una técnica estándar de penetración de cono.

Tabla 3.1 Principales características de los conos usados actualmente

Tipo de cono	Angulo del cono (°)	Peso del cono (g)	Penetración para el w_L (mm)
Indio	31	148	25.4
Ruso	30	76	10
Inst. Téc. Georgia	30	75	10
Inglés	30	80	20
Sueco	60	60	10
Inglés/Francés	30	80	20
Canada	60	60	10

A continuación se presentan en una forma muy resumida algunas investigaciones realizadas en diferentes países y autores.

3.5.1 Límites de consistencia, Karlsson, R. & The Laboratory Committee of the Swedish Geotechnical Society (1981)

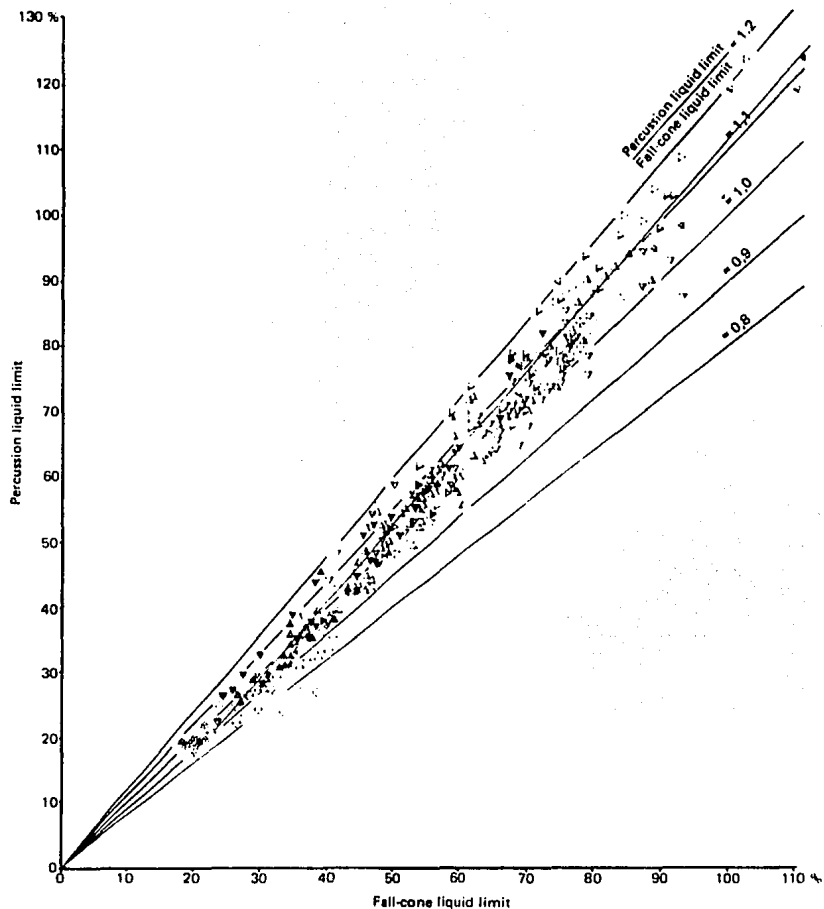
La comparación entre el límite líquido con la copa y el de cono se realiza para una gran número de suelos suecos, Fig 3.11, en donde el rango abarcado del límite líquido con el cono es de 18% a 110%; la ecuación de regresión que se presenta es la siguiente:

$$w_{Lcopa} = 1.13w_{Lcono} - 5 \quad (3.1)$$
$$[18\% < w_{Lcopa} < 125\%]$$

La Fig 3.12 presenta la correlación para suelos suecos con materia orgánica y un rango de límite líquido de cono entre 50% y 175%; la ecuación de regresión es:

$$w_{Lcopa} = 1.28w_{Lcono} - 13 \quad (3.2)$$
$$[50\% < w_{Lcopa} < 175\%]$$

La investigación presentada no se limita a mostrar la comparación entre valores de límites líquidos de diferentes suelos utilizando la copa de Casagrande y cono sueco, sino que abordan estudios detallados sobre la influencia de diferentes factores en los resultados que ambas técnicas proporcionan; los factores que contempla el estudio son: el número incorrecto de las percusiones, el peso de la copa, la altura de caída de la copa, las dimensiones del ranurador, la velocidad con que se aplica el número de golpes, el espesor de la muestra en la copa, la penetración incorrecta del cono, el peso del cono, el ángulo del cono, la altura inicial del cono y su penetración inicial.

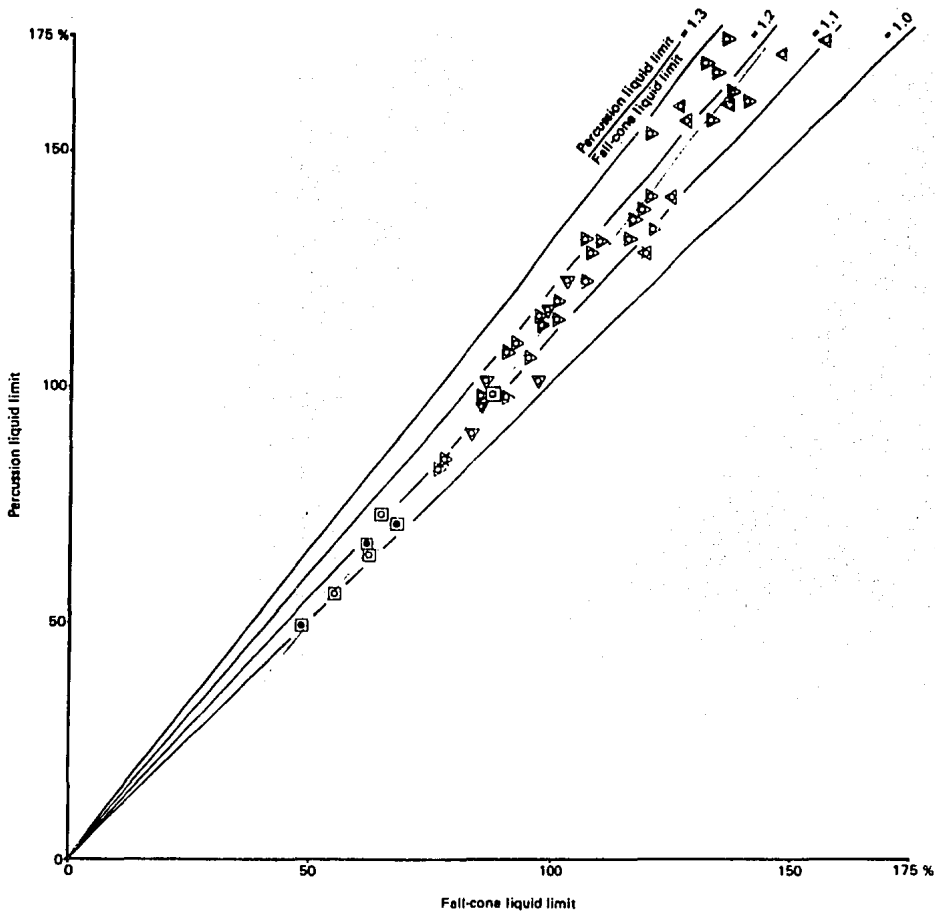


TYPE OF SOIL	SENSITIVITY GROUP			
	LOW SENSITIVE	MEDIUM SENSITIVE	HIGH SENSITIVE	QUICK CLAY
FRESH OR BRACKISH WATER DEPOSITED GLACIAL CLAY SILT AND BOULDER CLAY	△	△	△	△
Varved clay	△	△	△	△
Varved, silty clay	△	△	△	△
Varved, sandy clay	△	△	△	△
Varved, clayey silt	△	△	△	△
Varved silt	△	△	△	△
Clay till	△	△	△	△
SALT WATER DEPOSITED (MARINE) CLAY	▽	▽	▽	▽
Clay	▽	▽	▽	▽
Silty clay	▽	▽	▽	▽
Sandy clay	▽	▽	▽	▽

TYPE OF SOIL	SENSITIVITY GROUP			
	LOW SENSITIVE	MEDIUM SENSITIVE	HIGH SENSITIVE	QUICK CLAY
FRESH OR BRACKISH WATER DEPOSITED POST-GLACIAL CLAY AND SILT				
Clay				
Silty clay				
Clayey silt				
Silt				
Sulphide clay				
Silty sulphide clay				
Clayey sulphide silt				

— Regression line for the sedimentary clay,
 $w_{Lperc} = 1.13 \cdot w_{Lcone} - 5$

Fig 3.11 Comparación entre el límite líquido obtenido copa y el límite líquido con el cono sueco para suelos suecos (Karlsson, 1981)



- LEGEND**
- Organic clay
 - Organic clay (marine)
 - Organic sulphide clay
 - Organic silt (+ gyttja)
 - Organic silt (+ dy)

----- Regression line $w_{Lperc.} = 1.28 \cdot w_{Lcone} - 13$

Fig 3.12 Comparación entre el límite líquido obtenido copa y el límite líquido con el cono sueco para suelos suecos con materia orgánica (Karlsson, 1981)

3.5.2 Límite líquido de suelos, *Sivapullaiah & Sridharan (1985)*

Es una investigación sobre la determinación del límite líquido de mezclas de suelos; caolín y arenas con diferentes porcentajes de una bentonita ($w_L = 486\%$). Los suelos: caolín ($w_L = 48\%$), Limo1 ($w_L = 58\%$) y Limo2 ($w_L = 83\%$). Las arenas: arena angulosa que pasó la malla número 40 y fue retenida en la malla 100, arena redondeada gruesa que pasó la malla número 40 y retenida en la 100, y una arena redondeada fina que pasó la malla 40 y se retuvo en la malla número 200.

El equipo usado fue una copa de Casagrande y un cono indio de 148 g/31". Los valores que reportan corresponden a los valores medios de dos determinaciones para cada aparato. Para un total de 43 valores de límites líquidos presentan la siguiente correlación entre ambos aparatos:

$$w_{Lcupa} = 1.478w_{Lcono} - 21.6$$
$$[36\% < w_{Lcono} < 391\%] \quad (3.3)$$
$$r = 0.996$$

con un coeficiente de correlación r alto que indica una gran correlación lineal, y el rango para el w_{Lcono} , es entre 36.5 y 390.5% en contenido de agua y para la copa entre 37 y 536%. Algunas conclusiones que presentan son las siguientes:

- ▶ El límite líquido de una mezcla de suelos no es la suma de los límites líquidos de los suelos involucrados en ella afectados por una corrección correspondiente al porcentaje en la mezcla.
- ▶ El tamaño de las partículas de arena influyen en el valor del límite líquido cuando se mezcla con arcilla; la forma de la arena no tiene una influencia notable.
- ▶ El valor del límite líquido obtenido con el cono es menor al valor que se obtiene con la copa de Casagrande.
- ▶ Existe una excelente correlación lineal de los resultados obtenidos con ambas técnicas.

3.5.3 Límites líquido y plástico determinados con el cono que cae y la copa de Casagrande, *Wasti (1987)*

El autor de esta investigación presenta un estudio llevado a cabo sobre 15 suelos naturales y 10 mezclas de suelos artificiales para los que determina sus respectivos límites líquido y plástico. El límite líquido de cada suelo lo obtuvo de manera simultánea con una copa de Casagrande tipo americana (de base dura) y un cono inglés (BS1377, 1975). La correlación entre límites líquidos obtenidos con ambos aparatos para los suelos naturales es:

$$w_{Lcopa} = 0.9228w_{Lcono} + 0.6836$$

$$[27\% < w_{Lcopa} < 110\%] \quad (3.4)$$

$$r = 0.9634$$

Para los suelos artificiales la correlación que pudo determinarse fue:

$$w_{Lcopa} = 1.5671w_{Lcono} - 29.688$$

$$[145\% < w_{Lcopa} < 526\%] \quad (3.5)$$

$$r = 0.9588$$

Para los 25 valores del límite líquido presentados en dicho artículo se calculó la siguiente correlación:

$$w_{Lcopa} = 1.6179w_{Lcono} - 47.7403$$

$$[27\% < w_{Lcopa} < 526\%] \quad (3.6)$$

$$r = 0.9748$$

El autor presenta una expresión para obtener el *PI* que esta basada en conceptos del estado crítico de mecánica de suelos.

$$PI = \Delta \frac{\text{Log } 100}{\text{Log } \frac{w_1}{w_2}} = \Delta \frac{\text{Ln } 100}{\text{Ln } \frac{w_1}{w_2}} \quad (3.7)$$

donde

Δ es la separación vertical, en términos del contenido de agua, de las curvas de fluidez para dos conos de diferentes pesos.
 w_1 y w_2 pesos de conos, en el estudio $w_1/w_2=3$ y para ambos conos el ángulo de 30°

Entre las conclusiones que presenta, se citan las siguientes:

- ▶ La determinación de los límites de consistencia por los procedimientos descritos no son enteramente correspondientes, pero la existencia de una buena correlación demuestra que es factible el uso del cono que cae como una prueba deseable en la práctica.
- ▶ Para suelos con límite líquido alto, los obtenidos con el cono son menores y la desviación o diferencia aumenta.

3.5.4 Determinación del límite líquido de suelos con el cono sueco, *Mendoza (1991)*

Mendoza (1991, 1991b) presenta el uso de la técnica alternativa a la de la copa de Casagrande, técnica del *cono sueco*, con suelos de México; que en los países escandinavos esta técnica es ya de rutina. La particularidad de este trabajo es que hace la comparación de resultados obtenidos con ambos aparatos sobre suelos cuyo límite líquido se encuentra en un rango de $30\% < w_{L, \text{copa}} < 390\%$, haciendo uso en forma simultánea del HC tradicional y un HMO de tipo casero para secar suelos. Otro aspecto importante de la investigación es mostrar la influencia de un laboratorista experimentado y un operador con poca experiencia en laboratorio.

Los suelos ensayados se presentan en la Tabla 3.2 donde se resumen sus características físicas y mineralógicas.

El equipo utilizado conserva el principio de penetración del cono sueco, aunque con ciertas particularidades; éste fue diseñado y construido en el Instituto de Ingeniería, Fig 3.13. Está compuesto de una base metálica con un poste vertical el cual soporta la parte principal del aparato y es donde se coloca el cono; el cuerpo principal puede ajustarse verticalmente durante la prueba para que la punta del cono toque tangencialmente la superficie del suelo por ensayar, Fig 3.14. El sistema de sujeción del cono esta compuesto por una pequeña bobina que al estar encendida crea un campo electromagnético que es capaz de sujetarlo, y que al interrumpir la corriente eléctrica, presionando el botón de un interruptor, el cono cae por su peso propio para penetrar en el suelo, Fig 3.15. Para medir la penetración, el equipo tiene adosada una escala milimétrica y en el propio cono un pequeño vernier que ayuda a obtener mediciones con una precisión de 0.1 mm. Esta equipado con tres conos de acero inoxidable con acabado "espejo" de diferentes peso y ángulo: 100 g/30°, 60 g/60° y 10 g/30°; el que se usa para determinar el límite líquido es el segundo.

Con lo que respecta a la copa de Casagrande indica que se verificó el cumplimiento de norma ASTM D4318-84 (*antes D423-66*). El ranurador usado fue del tipo Casagrande, sólo que de material plástico que tiene la ventaja de no rayar la copa.

Los resultados que obtiene en ambos equipos se incluyen en la Tabla 3.3 y que corresponden a valores medios de dos determinaciones, en la que se incluye la diferencia entre límites, DIF, la diferencia relativa, $DIF/w_{L, \text{cono}}$, además de los parámetros de la recta de regresión para el total de los valores.

Tabla 3.2 Descripción y características de los suelos estudiados (Mendoza, 1991)

Suelo	Descripción y origen	Composición mineralógica	Contenido de agua in situ w_n , en %	w_L (%)	PI
CH-Bentonita	Material adquirido comercialmente	Proporción mayor: Montmorilonita	8.5 (en polvo)	339.0	301.0
CL-Caolín	Material adquirido comercialmente	Proporción mayor: Caolinita	1.2 (en polvo)	35.5	11.1
SM-San Vicente	Material arenolimoso proveniente de lomeríos suaves formados por tobas volcánicas, localizados al oriente del Distrito Federal sobre la carretera México- Texcoco	Proporción mayor: feldespato Media: montmorilonita y haloisita Trazas de cristobalita y anfíbola	30.0	32.9	6.5
SC-Chicoasén	Material arenoarcilloso proveniente de la zona baja del préstamo "La Costilla" usado para el núcleo impermeable de la presa Chicoasén, Chiapas. Se trata de lutitas alteradas y redepositadas	Proporción mayor: cuarzo Media: clorita Trazas de mica, montmorilonita, feldespatos y calcita	10.0	30.7	10.2
MH-Necaxa	Material limoarcilloso residual proveniente de la descomposición de basaltos en la ladera derecha de la presa Necaxa, Estado de Puebla	Proporción mayor: metahaloesita y haloesita hidratada Media: hematita, cuarzo y magnetita Trazas de ilmenita y montmorilonita	51.6	74.0	23.7
CH-La Peña	Material arcilloso proveniente de un depósito aluvial del Cuaternario, localizado en la cercanía de la boquilla de la presa La Peña, Estado de Hidalgo	Proporción mayor: montmorilonita Media: feldespatos Trazas de cristobalita, cuarzo y anfíbola	21.6	69.4	38.3
Arcilla de la Ciudad de México	Sondeo en Av. Francisco del Paso y Troncoso, a 13m de profundidad	No determinada. Ver información en Marsal y Hazari, 1969	292.0	315.0	218.0



Fig 3.13 Aparato de cono sueco construido en Instituto de Ingeniería, UNAM

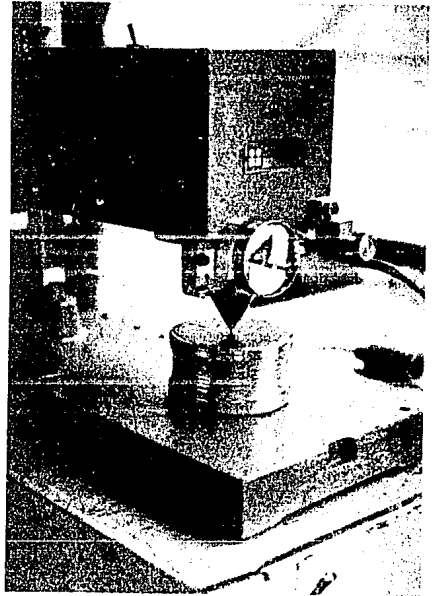


Fig 3.14 Posición inicial del cono

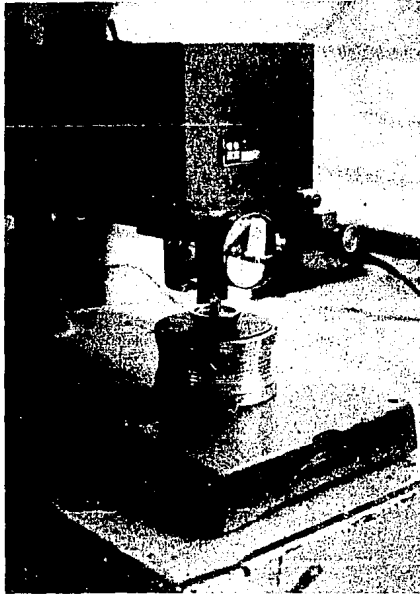


Fig 3.15 Posición final del cono después de su indentación

Tabla 3.3 Límites líquidos determinados con el cono sueco y la copa de Casagrande (Mendoza, 1991)

Suelo		Cono sueco x	Copa de Casagrande y	DIF	DIF/ $w_{L\text{copa}}$	y_{reg}
1	BENT-CAOLIN	40.40	35.50	4.90	0.12128	39.8957
2		58.00	60.00	-2.00	-0.03448	62.5220
3		60.00	62.50	-2.50	-0.04166	65.0932
4		80.50	91.00	-10.50	-0.13043	91.4477
5		84.50	94.50	-10.00	-0.11834	96.5901
6		100.00	118.00	-18.00	-0.18000	116.5167
7		120.00	146.50	-26.50	-0.22083	142.2284
8		137.50	169.50	-32.00	-0.23272	164.7262
9		155.00	194.00	-39.00	-0.25161	187.2240
10		175.00	220.00	-45.00	-0.25714	212.9358
11		199.00	249.70	-50.70	-0.25477	243.7899
12	CD. DE MEXICO	215.00	276.00	-61.00	-0.28372	264.3593
13	CH-LA PEÑA	325.00	389.00	-64.00	-0.19692	405.7739
14	CHICOASEN	80.20	84.40	-4.20	-0.05236	91.0620
15	SC	33.00	30.20	2.80	0.08484	30.3823
16	SAN VICENTE	33.10	31.90	1.20	0.03625	30.5109
17	SM	33.90	31.70	2.20	0.06489	31.5393
18	MH-NECAXA	34.00	32.90	1.10	0.03235	31.6679
19		76.60	77.40	-0.80	-0.01044	86.4339
Salida de regresión:						
Constante			-12.042			
Err Estándar Est Y			6.67449			
R ²			0.99582			
No. de observaciones			19			
Grados de libertad			17			
R			0.99790			
Coeficiente X		1.285587				
Err Estándar de coef.		0.020195				

La ecuación de regresión es:

$$w_{L\text{copa}} = 1.2856w_{L\text{cono sueco}} - 12.04$$

$$[30\% < w_{L\text{copa}} < 390\%] \quad (3.10)$$

$$r = 0.9979$$

Presenta además una recta de regresión para valores de límite líquido menores a 100%:

$$w_{Lcopa} = 1.1949w_{Lcono\ sueco} - 9.27$$

$$[30\% < w_{Lcopa} < 100\%]$$

$$r = 0.9948$$
(3.9)

La comparación de los resultados se incluyen en la Fig 3.16 junto con la recta de regresión y las curvas que limitan el intervalo de confianza de 98%. Puede observarse que los datos experimentales de la Tabla 3.3 caen, en la mayoría, dentro de dicho intervalo mostrando así en forma estadística que la determinación del límite líquido con el cono sueco es válida y su correlación con la copa de Casagrande es lineal.

La Fig 3.17 incluye la correlación obtenida, pero las muestras en este caso fueron secadas en el HMO, la ecuación de la recta es la siguiente:

$$w_{Lcopa} = 1.325w_{Lcono\ suero} - 12.84$$

$$[30\% < w_{Lcopa} < 390\%]$$

$$r = 0.9923$$
(3.10)

Para valores menores a 100%, la ecuación es:

$$w_{Lcopa} = 1.1943w_{Lcono\ sueco} - 8.916$$

$$[30\% < w_{Lcopa} < 100\%]$$

$$r = 0.9968$$
(3.11)

LIMITES LIQUIDOS (%)
HORNO DE CONVECCION - OPERADOR 1

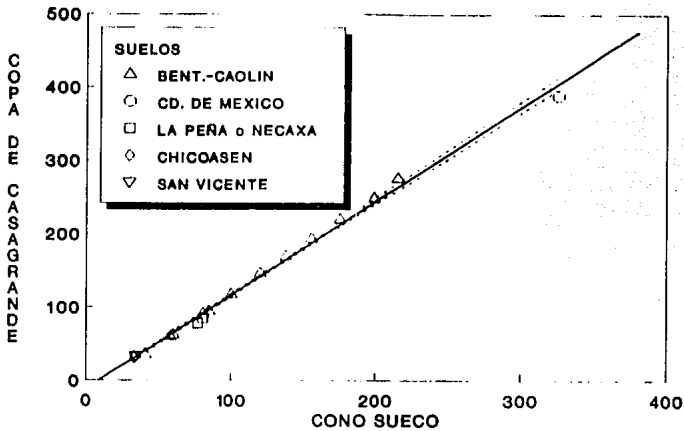


Fig 3.16 Correlación entre los límites líquidos de diversos suelos, obtenidos con la copa de Casagrande y el cono sueco, secados con el HC (Mendoza, 1991)

LIMITE LIQUIDO (%)
HORNO DE MICROONDAS

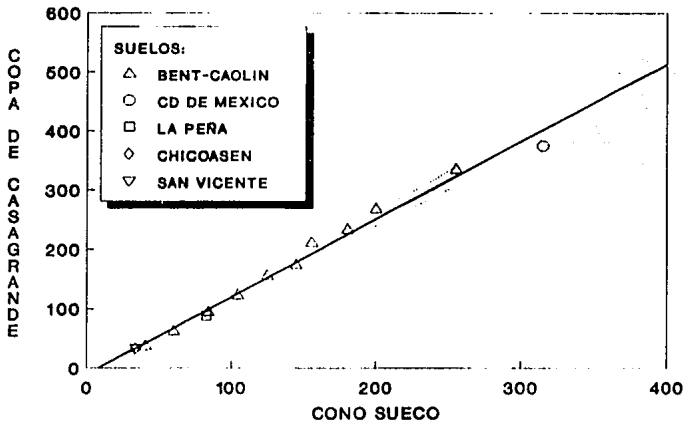


Fig 3.17 Correlación entre los límites líquidos de diversos suelos, obtenidos con la copa de Casagrande y el cono sueco, secados con el HMO (Mendoza, 1991)

El efecto de los operadores en el manejo de la copa de Casagrande puede verse en la Fig 3.18, y en la Fig 3.19 el efecto en el cono sueco. El *Operador 1* tiene gran experiencia en el manejo del equipo de la copa, cosa que no tiene el *Operador 2*; ambos operadores sin experiencia en el equipo del cono sueco. Para evaluar la influencia del operador, de una forma simple, puede verse que la dispersión de los resultados en la copa es mayor que en el cono. El autor compara los coeficientes de correlación de ambos aparatos, obteniendo; para la copa $r=0.99543$ y para el cono de 0.99904 .

Algunas conclusiones que presenta el autor de esta investigación son las siguientes:

- ▶ El cono sueco es una técnica más sencilla y tan confiable como lo puede ser la técnica tradicional.
- ▶ Para suelos con w_L superiores a 40%, el w_L que se obtiene en la copa es mayor al del cono.
- ▶ La dispersión de los resultados, debido a la influencia de los operadores, es menor cuando se usa el cono e incluso cuando los operadores no tienen gran experiencia en laboratorio.
- ▶ El uso del cono sueco juntamente con el HMO pueden proporcionar el límite líquido de un suelo en aproximadamente una hora o menos.

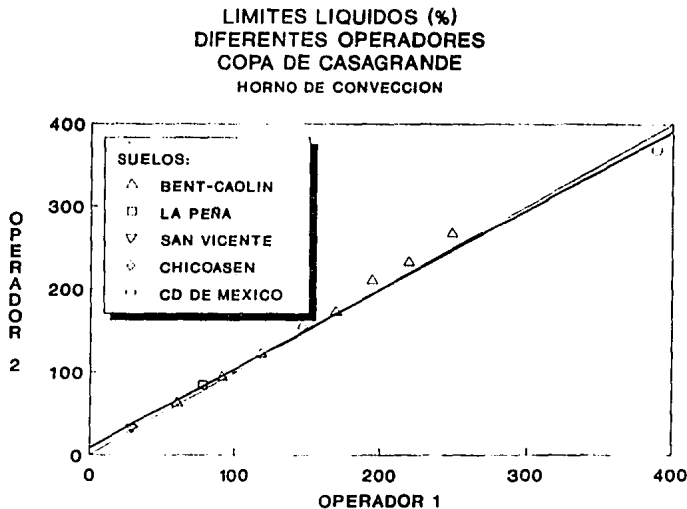


Fig 3.18 Influencia de los operadores en los límites líquidos obtenidos con la copa de Casagrande (*Mendoza, 1991*)

**LIMITES LIQUIDOS
DIFERENTES OPERADORES
CONO SUECO
HORNO DE CONVECCION**

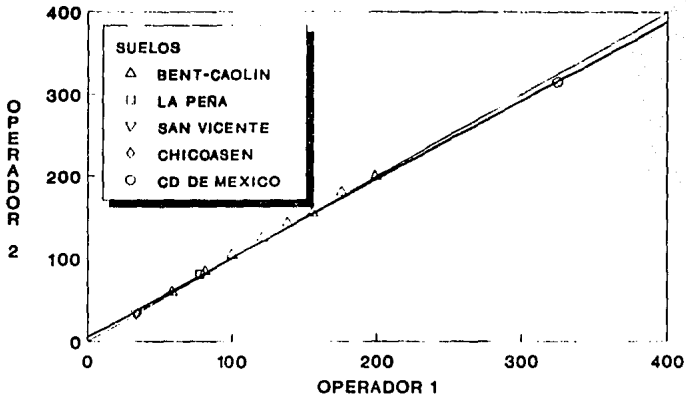


Fig 3.19 Influencia de los operadores en los límites líquidos obtenidos con el cono sueco (Mendoza, 1991)

Como se ha visto, el uso de técnicas alternativas a la copa de Casagrande se ha incrementado notablemente; no resulta ser extraordinario que se haya extendido por buena parte del mundo debido a su facilidad de operación. Se resumen en la Tabla 3.4 los principales países que utilizan o han investigado el uso de algún cono penetrante juntamente con la relación de cono-copa.

Tabla 3.4 Relación entre el $w_{L\text{cono}}$ y $w_{L\text{copa}}$ para diferentes conos usados en diferentes países

País	Referencia	Tipo de cono	Tipo de copa (base)	Relación entre cono y copa	Rango del $w_{L\text{copa}}$ (%)	Número de pruebas
India	Uppal & Aggarwal (1958)	indio	dura	$w_{L\text{copa}} = 1.075w_{L\text{cono}} - 3.4^a$	20-90	-
Noruega	Flaate (1964)	indio	suave	$w_{L\text{copa}} = 1.05w_{L\text{cono}}$	15-90	33
Bulgaria	Stefanoff (1957)	ruso	-	$w_{L\text{copa}} = 1.5w_{L\text{cono}} - 7.4$	28-90	84
Yugoslavia	Bozinovic (1958)	ruso	-	$w_{L\text{copa}} = 1.2w_{L\text{cono}} - 5.3$	-	-
Alemania del Este	Matschak & Reitschel (1965)	ruso	-	$w_{L\text{copa}} = 1.2w_{L\text{cono}} - 3.7$	-	-
Checoslovaquia	Skopek & Ter-Stepanian (1975)	ruso	suave	$w_{L\text{copa}} = 1.4w_{L\text{cono}} - 10$ $w_{L\text{copa}} = 324w_{L\text{cono}} / (w_{L\text{copa}} + 328)$	20-100 17-382	321
E.U.A.	Sowers et al (1959)	Georgia	dura	$w_{L\text{copa}} = 1.26w_{L\text{cono}} - 10.7^a$	10-130	~ 20
Inglaterra	Sherwood & Ryley (1968)	inglés	suave	$w_{L\text{copa}} = 1.1w_{L\text{cono}} - 3^a$	25-90	25
Inglaterra	Littleton & Farmilo (1977)	inglés	suave	$w_{L\text{copa}} = 1.03w_{L\text{cono}} - .65$	20-100	~ 15
Guyana	Budhu (1985)	inglés	suave	$w_{L\text{copa}} = 1.07w_{L\text{cono}} - 4.3$	20-100	-
Inglaterra	Belsivo et al (1985)	inglés	dura	$w_{L\text{copa}} = 1.0w_{L\text{cono}} - 4.29^a$	34-134	16
Inglaterra	Sampson & Netterberg (1985)	inglés	dura	$w_{L\text{copa}} = 0.96w_{L\text{cono}} - 3.2$ $w_{L\text{copa}} = 0.97w_{L\text{cono}} - 3.1$	20-120 20-100	43 123
India	Sivapullaiah & Sridharan (1985)	indio	-	$w_{L\text{copa}} = 1.478w_{L\text{cono}} - 21.6$	37-536	43
Inglaterra	Wasti (1987)	inglés	dura	$w_{L\text{copa}} = 0.994w_{L\text{cono}} - 4.893$	27-110	15
Suecia	Karlsson (1981)	succo	-	$w_{L\text{copa}} = 1.13w_{L\text{cono}} - 5$ $w_{L\text{copa}} = 1.28w_{L\text{cono}} - 13$	~ 18-125 50-175	- -
México	Mendoza (1991)	succo	dura	$w_{L\text{copa}} = 1.1949w_{L\text{cono}} - 9.27$ $w_{L\text{copa}} = 1.2856w_{L\text{cono}} - 12.04$	30-100 30-390	11 19
México	Ovando-Shelley (1992)	inglés	dura	$w_{L\text{copa}} = 1.2613w_{L\text{cono}} - 7.839$	40-220	15

^a Interpretación de gráfica publicada.

4. EVALUACION EXPERIMENTAL DE LAS TECNICAS PARA EL SECADO DE SUELOS

El secado de suelos para obtener el contenido de agua no se dificulta en un laboratorio de Mecánica de Suelos, dado que se dispone del equipo necesario. Pero cuando se requiere conocer este parámetro en campo y más aún en forma rápida, generalmente se recurre a técnicas no convencionales de laboratorio.

Se han desarrollado técnicas para la obtención del contenido de agua en un tiempo corto, como las presentadas en el capítulo 2. De las técnicas presentadas se puede elegir una o varias para resolver un problema determinado, dependiendo de las restricciones inherentes de cada una. La experimentación de cada una de ellas es obligada para conocer la confiabilidad que pueden representar.

En este capítulo se presentan resultados de un programa experimental llevado a cabo con cinco técnicas de secado para 13 suelos. El programa tuvo por objetivo el determinar correlaciones entre las técnicas experimentales con la tradicional, HC, y la confiabilidad que representa su uso.

4.1 Suelos ensayados

En la tabla 4.1 se resumen las principales características físicas y mineralógicas de los suelos involucrados; cuatro de ellos son los que *Mendoza (1991)* utilizó en su investigación. Los suelos son representativos de las cuatro regiones de la carta de plasticidad, por lo que son una muestra representativa de los suelos más usuales; de aquí se tienen entonces que las conclusiones que se

derivan son de alcance general.

Tabla 4.1 Características de los suelos ensayados para obtener el w(%) en diferentes técnicas

SUELOS	DESCRIPCION, ORIGEN Y COMPOSICION MINERALOGICA	CONTENIDO DE AGUA w_{nat} (%)	w_l (%)	w_p (%)	PI (%)
San Vicente (SC)	ver Tabla 3.2	6.38	30.61	22.79	7.80
Chicoasén (SC)	ver Tabla 3.2	2.65	31.60	18.95	12.65
Caolín (Cl.)	Material adquirido comercialmente con proporción mayor de Caolinita	0.90 (en polvo)	47.30	20.40	26.90
La Peña (CH)	ver Tabla 3.2	11.04	70.23	30.02	40.21
Bentonita II (CH)	Material adquirido comercialmente con proporción mayor de Montmorilonita	13.46 (en polvo)	270.40	44.65	225.50
Necaxa (MH)	ver Tabla 3.2	10.86	78.60	56.40	22.20
Zócalo (MH)	Sondeo en el centro de la Ciudad de México, profundidad de la muestra entre 6.30 a 6.62 m.	21.74	73.70	55.00	18.70
San Antonio Abad (MH)	Lumbrera norte de la Iglesia de San Antonio Abad, centro de la Cd. de México con una prof. de 9.6 m. La composición mineralógica no ha sido determinada. Ver información en <i>Marsal y Mazari, (1969)</i>	361.29	346.34	127.80	218.40

4.2 Técnicas y equipos utilizados

4.2.1 Técnicas utilizadas

Las técnicas usadas en el programa experimental fueron las siguientes:

- ▶ Horno de convección (HC)
- ▶ Horno de microondas (HMO)
- ▶ Secado intensivo en estufa
- ▶ Del alcohol, basado en su combustión
- ▶ Del tolueno

4.2.2 Equipos utilizados

El **horno de convección** empleado mantiene una temperatura constante de 110 ± 5 °C, con un volumen de 75 cm³, dos parrillas, una a 14 cm y otra a 29.5 cm de la base. Los recipientes para las muestras de suelo fueron vidrios de reloj refractarios de 10 cm de diámetro.

El **horno de microondas**, Fig 4.1, tiene una capacidad de 40 dm³ (1.4 ft³), voltaje de $120 \pm 10\%$ volts, con potencia de 800 W, su frecuencia de operación es de 2450 MHz, puede regularse la potencia relativa de 1 a 10; para los niveles 1 a 3 el "nivel de calor" es *bajo*, para los niveles de 4 a 7 es *medio* y finalmente para los restantes el calor es *alto*. El porcentaje de emisión de microondas va de acuerdo al nivel de potencia; para el nivel 1 el porcentaje de tiempo en que se emiten microondas es del 10% del tiempo total que permanece encendido el horno y para la potencia 10 continuamente se emiten microondas.

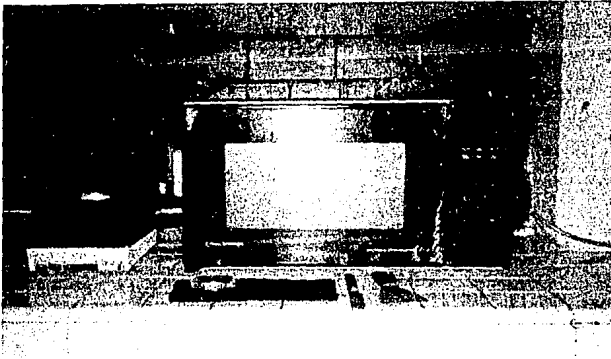


Fig 4.1 Equipo utilizado para secar muestras de suelo en el HMO

Para la **técnica del secado intensivo** se utilizó una estufa tipo casera que utiliza gas LP como combustible, Fig 4.2, y recipientes de lata con diámetro de 8.5 cm y altura de 4 cm.

En el caso de la **técnica del alcohol** los recipientes usados fueron latas de 8.5 cm de diámetro y altura de 4 cm, el alcohol fue de 96° GL, Fig 4.3.

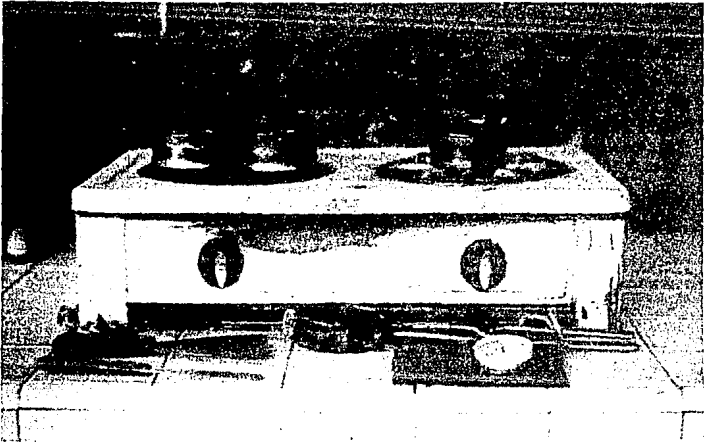


Fig 4.2 Equipo utilizado para secar muestras de suelo en estufa

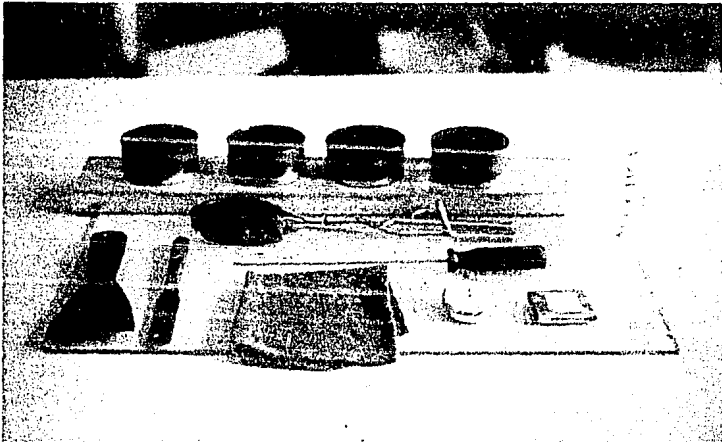


Fig 4.3 Equipo utilizado para secar muestras de suelo con la técnica del alcohol

El equipo principal utilizado en la técnica del tolueno fue una trampa de destilación con una capacidad de 25 ml, matraz Erlenmeyer de 225 ml con entrada 24/40 esmerilada, columna de enfriamiento y parrilla eléctrica de 1200 W, Fig 4.4. Las características del tolueno son las siguientes:

Tolueno	$C_6H_5CH_3$
Residuo después de la evaporación	0.001 %
Agua (H_2O)	0.01 %
Cobre (Cu)	0.1 ppm
Hierro (Fe)	0.1 ppm
Plomo (Pb)	0.5 ppm
Níquel (Ni)	0.1 ppm
Compuestos de azufre	0.0015 %
Punto de ebullición	110.6 °C

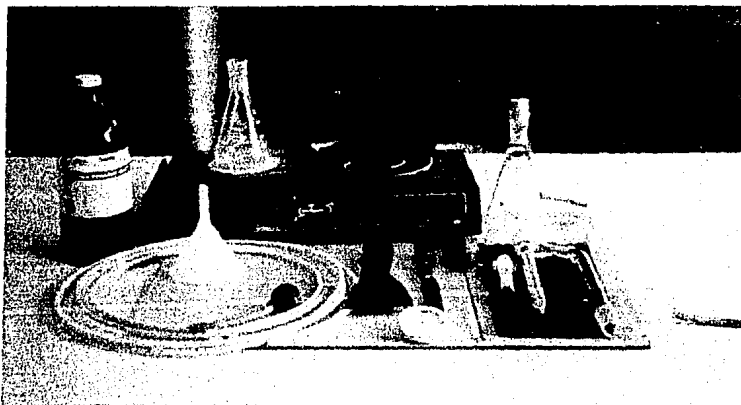


Fig 4.4 Equipo utilizado para obtener el contenido de agua con la Técnica del tolueno

4.3 Procedimiento de ensaye

Se sabe que existe variación entre los resultados de los contenidos de agua determinados tanto en el HC como en el HMO, aún para una misma muestra de suelo que se haya mezclado intensamente para homogeneizarla (Mendoza, 1991). Teniendo el antecedente anterior, en este trabajo cada contenido de agua que se reporta, en cada técnica, horno y suelo, corresponde al valor medio de 4 determinaciones; el número total de muestras ensayadas fue de 260.

Para tener resultados totalmente comparables, las muestras de cada suelo previamente se mezclaban en una forma intensa sobre un vidrio plano con una espátula de abanico para lograr su homogeneidad, añadiendo agua destilada si se requería. El peso húmedo inicial (PHI) para cada una de las muestras utilizadas fue de 30 g permitiendo que su tiempo de curado nunca fuese menor

de 24 horas antes de su secado. La balanza utilizada tiene una precisión de 0.01 g.

En las técnicas del HC, HMO y alcohol las cuatro muestras se secaban simultáneamente, y en el caso de la estufa y tolueno era una a una. Cabe mencionar que en la investigación que *Mendoza (op cit)* presenta no se realizan determinaciones simultáneamente en el HMO y los valores que reporta corresponden al valor medio de dos (determinaciones hechas una a una), lo que quiere decir que en este estudio se aumentó la productividad en las pruebas.

4.3.1 Horno de convección

La colocación del suelo en los vidrios de reloj se hizo con una espátula de cuchillo, y para obtener exactamente los 30 g de PHI se removía o añadía suelo con una pequeña espátula. El tiempo que permanecieron las muestras en el HC nunca fue menor a 23 horas y no mayor a 24, tiempo considerado como una jornada.

4.3.2 Horno de microondas

Se adoptó el mismo procedimiento de colocación del suelo en los vidrios de reloj del HIC. Las cuatro muestras se secaban con potencia máxima (10) a intervalos de tiempo de 30 segundos, 1 o 2 minutos dependiendo de que tan húmedo estaba el suelo; es decir, si el suelo aparentaba tener poca cantidad de agua los incrementos de tiempo se daban a cada 30 segundos y a cada minuto si tenía mayor cantidad de agua. De esta forma se conocía la variación del peso de la muestra del suelo en el proceso de secado dado que al final del lapso de tiempo se pesaba. El secado de cuatro muestras permite establecer dos valores intermedios entre el máximo y el mínimo, por lo que su valor medio de los cuatro es más significativo si solamente se calculara de dos.

Se aceptó como definición de *peso seco* cuando la diferencia entre dos pesadas sucesivas de la misma muestra fuese de 0.01 g, que es la precisión de la balanza usada.

4.3.3 Secado intensivo en estufa

Teniendo la cantidad de suelo dentro de la lata se colocaba sobre la estufa para que comenzara a perder agua. Para conocer el cambio de peso de la muestra se retiraba de la estufa a intervalos de tiempo regulares, entre 1 y 3 minutos, para pesarla. La prueba finalizaba cuando la diferencia entre dos pesadas de la misma lata era menor o igual a 0.03 g, en la mayoría de las pruebas se tuvo una diferencia de 0.01 g e inclusive nula.

4.3.4 Técnica del alcohol, basado en su combustión

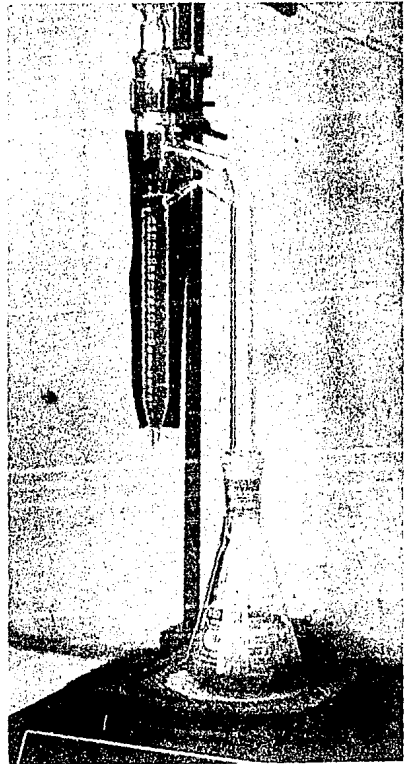
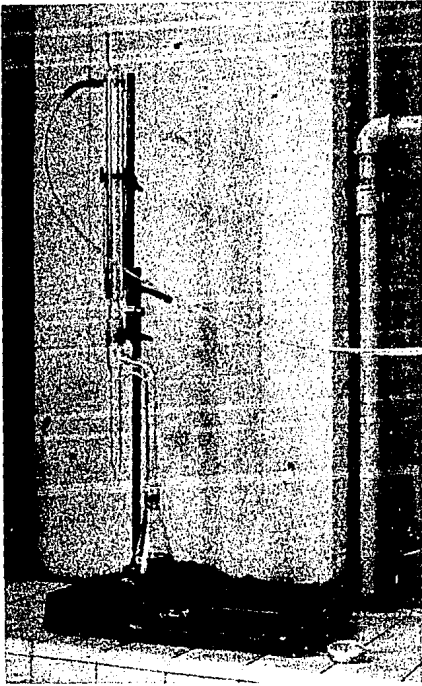
En los recipientes de lata se colocaba la cantidad de suelo establecida y se añadía alcohol; la cantidad que inicialmente se agregaba era de 10 ó 15 g. Esta técnica presenta varios problemas, entre ellos: la posible pérdida de material cuando se mezcla el suelo con el alcohol. Durante este

estudio, la mezcla se realizaba mezclando suelo-alcohol con un desarmador de aproximadamente 3 mm de diámetro para evitar que gran cantidad de suelo se pegara a él. La cantidad de alcohol que inicialmente se añadía no era suficiente para lograr la completa eliminación del agua, por lo que se recurría a la repetición de incorporación de alcohol y su combustión. Es claro que a mayor cantidad de agua en el suelo debe ser mayor la cantidad de alcohol para lograr su completa eliminación. El querer conocer la variabilidad del peso de la muestra obligaba a esperar el enfriamiento de la lata, lo que se propiciaba al colocarla sobre una franela húmeda. Finalizaba la prueba cuando la diferencia entre dos pesadas de la misma muestra era de 0.03 g; generalmente se tuvieron diferencias de 0.01 g.

4.3.5 Técnica del tolueno

Inicialmente se hicieron pruebas para conocer los pormenores de la técnica. El primer problema que se presentó en su uso fue en la colocación del suelo dentro del matraz; las soluciones que se dieron son las siguientes: para suelos con poca cantidad de agua, de consistencia grumosa, se colocaba con un pequeño embudo, y para suelos con una consistencia viscosa por medio de una jeringa cortada por su sección transversal; de esta manera el suelo se *inyectaba* al matraz, con lo anterior se evita el introducir al suelo en un *taco* como se describe en el inciso 2.2.7. La prueba se daba por terminada cuando *no se registraba goteo de agua*. En la Fig 4.5 se muestra etapas de la prueba.

a) Instalación del equipo y muestra



b) Proceso ebullición-distilación

Fig 4.5 Etapas para obtener el contenido de agua en la técnica del tolueno

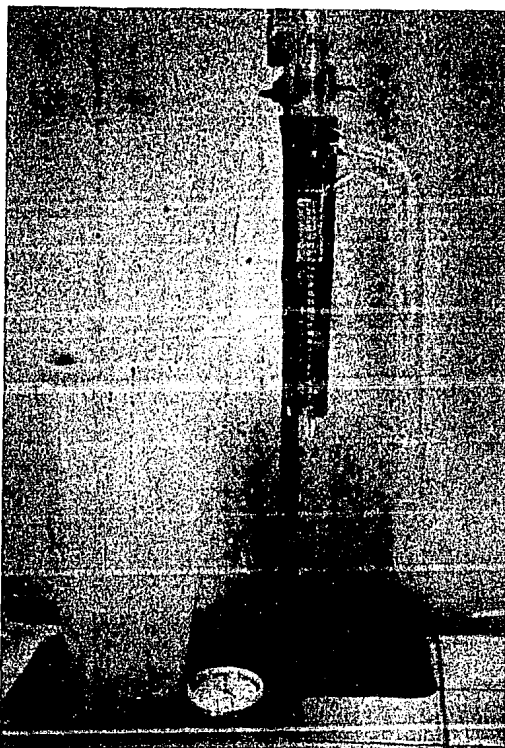


Fig 4.5 Etapas para obtener el contenido de agua en la técnica del tolueno
c) Lectura del volumen de agua de la muestra

4.4 Análisis de resultados

4.4.1 Horno de microondas (HMO) - horno de convección (HC)

En la Tabla 4.2 se presentan los resultados de los contenidos de agua para los suelos secados en ambos hornos junto con el tiempo requerido para su secado, se incluye la diferencia entre los contenidos de agua, $DIF = w_{HMO} - w_{HC}$, y la diferencia relativa, DIF/w_{HC} .

Tabla 4.2 Contenidos de agua de diferentes suelos secados en el HMO y HC

Suelo	w(%) HC y	Tiempo (hrs)	w(%) HMO x	Tiempo (min)	DIF	DIF/w _{HMO} (%)	y _{ref}	
1	CHICOASEN (SC)	21.45	23	21.46	6	0.01	0.04662	21.5132
2	SAN VICENTE (SM)	31.54	23	30.70	9	-0.84	-2.66328	30.7675
3	CHICOASEN (SC)	31.65	23.5	31.06	5	-0.59	-1.86414	31.1281
4	SAN VICENTE (SM)	32.60	23.3	32.42	8	-0.18	-0.55215	32.4902
5	LA PEÑA (CH)	37.44	23.5	36.63	10	-0.81	-2.16346	36.7067
6	CAOLIN (CL)	46.43	23.5	45.91	10	-0.52	-1.11997	46.0010
7	NECAXA (MH)	56.54	23	56.23	13	-0.31	-0.54828	56.3370
8	NECAXA (MH)	74.06	23	74.35	11	0.29	0.39157	74.4851
9	LA PEÑA (CH)	75.59	24	74.98	9	-0.61	-0.80699	75.1161
10	ZOCALO	86.42	23.5	86.16	9	-0.26	-0.30086	86.3134
11	BENTONITA II (CH)	122.37	23	123.58	9	1.21	0.98880	123.7913
12	BENTONITA II (CH)	225.47	23.75	228.95	10	3.48	1.54344	229.3245
13	SAN ANTONIO ABAD	394.48	23	391.44	13	-3.04	-0.77063	392.0661
Salida de Regresión:				val.min	-3.04	-2.6632%		
Constante		0.019957	val.máx	3.48	1.5434%			
Err Estándar Est Y		1.500576	val.med	-1.66	-0.6014%			
R Cuadrado		0.999814						
No. de Observaciones		13						
Grados de Libertad		11						
R		0.999907						
Coeficiente de X		1.001548						
Err Estándar de Coef.		0.004124						

El valor medio de la diferencia relativa de toda la muestra es de -0.6014%, que indica que los w% que se obtiene en el HC son *generalmente* mayores a los determinados con el HMO. Para algunos suelos su diferencia es mayor en comparación a los demás suelos, tal es el caso del suelo CII-Bentonita II que es de 3.48% en contenido de agua, o bien el suelo MH-San Antonio Abad que su diferencia es negativa, -3.04% en contenido de agua.

Para los datos anteriores, (w_{HMO}, w_{HC}) = (x, y), se calculó la recta de regresión tomando en cuenta la totalidad de los valores; se tienen en total 13 observaciones para ambos hornos. La recta tiene por ecuación:

$$y - \bar{y} = b(x - \bar{x}) \tag{4.1}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad ; \quad \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$$

El coeficiente de regresión, **b**, (pendiente de la recta) se calcula con la ecuación siguiente:

$$b = \frac{s_{\bar{x}\bar{y}}}{s_{\bar{x}\bar{x}}} \quad (4.2)$$

donde la suma de los productos de las desviaciones es:

$$s_{\bar{x}\bar{y}} = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (4.3)$$

y la suma de los cuadrados de las desviaciones:

$$s_{\bar{x}\bar{x}} = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (4.4)$$

La ecuación de regresión obtenida para el total de los contenidos de agua, en porcentaje, de ambos hornos es:

$$w_{HC} = 1.0015w_{HMO} + 0.01996 \quad (4.5)$$

[21% < w_{HMO} < 395%]

El coeficiente de correlación, r, es una *medida de la dependencia* de las variables (x, y) que se obtiene de la siguiente manera:

$$r^2 = \frac{s_{\bar{x}\bar{y}}^2}{s_{\bar{x}\bar{x}} s_{\bar{y}\bar{y}}} \quad (4.6)$$

para los datos se obtuvo un r = 0.99990 que demuestra una gran dependencia lineal entre ambas variables; es decir, los datos observados se ajustan perfectamente a una recta de regresión.

Otra forma de demostrar la bondad de los puntos observados de la recta de regresión es calcular las curvas que son fronteras del *intervalo de confianza*, y se definen como:

$$y_k = y_g \pm z_k s_g \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{(x - \bar{x})^2}{s_{\bar{x}\bar{x}}}} = y_g \pm f(x) \quad (4.7)$$

donde

y_g es la ordenada de la recta de regresión para la abscisa x
 z_k valor crítico, es una constante, que también se le llama *coeficiente de confianza*

para un nivel de confianza de $(1-\alpha)$. Se obtiene de la distribución *t* de Student para $n = N-2$ grados de libertad (Blume, 1974).

$$s_g^2 = \frac{s_{y\bar{y}} - b^2 s_{x\bar{x}}}{N-2} \quad (4.8)$$

s_g^2 es la variancia de los valores observados

$$s_{y\bar{y}} = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \quad (4.9)$$

$s_{y\bar{y}}$ es la suma de los cuadrados de las desviaciones para las ordenadas observadas

En la Fig 4.6 se incluye el total de los puntos observados, la recta de regresión obtenida y las curvas del intervalo de confianza para un nivel de confianza de $(1-\alpha) = 0.98$. Esto significa que una probabilidad de 98%, el valor de y se encuentra entre ambas curvas.

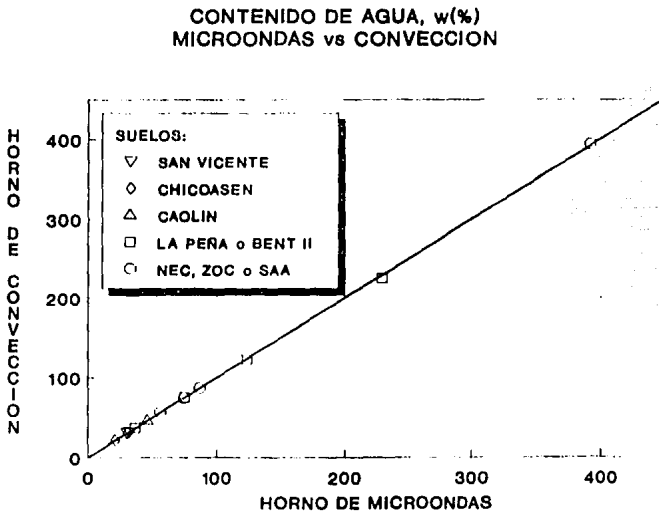


Fig 4.6 Correlación entre los contenidos de agua para diferentes suelos, obtenidos en el HMO y HC

4.4.2 Secado intensivo en estufa - horno de convección

En la Tabla 4.3 se recogen los datos de los contenidos de agua alcanzados con ambas técnicas y contiene los mismos parámetros definidos para la Tabla 4.2.

Tabla 4.3 Contenidos de agua para diferentes suelos secados en la estufa y HC

	Suelo	w(%) HC y	Tiempo (hrs)	w(%) Estufa x	Tiempo (min)	DIF	DIF/w _{HC} (%)	y _{reg}
1	CHICOASEN (SC)	21.45	23	22.01	12	0.56	2.61072	21.3763
2	SAN VICENTE (SM)	31.54	23	33.32	12	1.78	5.64363	32.2148
3	CHICOASEN (SC)	31.65	23.5	31.99	11	0.34	1.07425	30.9403
4	SAN VICENTE (SM)	32.60	23.3	34.76	15	2.16	6.62577	33.5948
5	LA PEÑA (CH)	37.44	23.5	40.38	15	2.94	7.85256	38.9805
6	CAOLIN (CL)	46.43	23.5	47.49	13	1.06	2.28301	45.7941
7	NECAXA (MH)	56.54	23	59.74	18	3.20	5.65971	57.5334
8	NECAXA (MH)	74.06	23	75.06	23	1.00	1.35026	72.2147
9	LA PEÑA (CH)	75.59	24	77.96	23	2.37	3.13534	74.9938
10	ZOCALO	86.42	23.5	90.97	16	4.55	5.26498	87.4614
11	BENTONITA II (CH)	122.37	23	124.77	22	2.40	1.96127	119.8523
12	BENTONITA II (CH)	225.47	23.75	236.09	38	10.62	4.71016	226.5315
13	SAN ANTONIO ABAD	394.48	23	411.42	29	16.94	4.29426	394.5521
Salida de Regresión:					val. mín	0.34	1.0742%	
Constante			0.283889	val. máx	16.94	7.8525%		
Err Estándar Est Y			1.280418	val. med	3.84	4.0358%		
R Cuadrado			0.999864					
No. de Observaciones			13					
Grados de Libertad			11					
R			0.999932					
Coeficiente de X			0.958311					
Err Estándar de Coef.			0.003367					

Puede observarse en la tabla anterior que la diferencia relativa máxima alcanzada es de 7.85% que corresponde al suelo CH-La Peña, mientras que el valor medio es de 4.03% lo que indica que los w% para los suelos secados en la estufa son mayores a los que se obtienen con el HC. La diferencia de los contenidos de agua crece cuando el contenido de agua de los suelos se incrementa, como se desprende de los resultados de la tabla anterior; tal es el caso de la arcilla de la ciudad de México (MH-San Antonio Abad) con una diferencia notable de 16.94% en contenido de agua, en cambio la diferencia mínima corresponde al suelo SC-Chicoasén con un valor de 0.34% en contenido de agua.

El hecho de que los contenidos de agua alcanzados con la estufa sean siempre mayores al los del HC, $w_{ESTUFA} > w_{HC}$, se debe a que seguramente ocurre un sobrecalentamiento en el suelo por la cantidad de energía calorífica recibida, elevando su temperatura por arriba de los 110° C, lo que ocasiona que el agua adsorbida del suelo se pierda en una gran parte.

El tiempo necesario para obtener el peso seco del suelo en la estufa fue de por lo menos 11 minutos para el suelo SC-Chicoasén, y un máximo de 38 minutos en el suelo CH-Bentonita II. El tiempo se incrementa cuando la cantidad de agua en el suelo crece; recuérdese que el PHI es el mismo.

La recta de correlación para ambos contenidos de agua que se obtiene es:

$$w_{HC} = 0.9583w_{ESTUFA} + 0.28388$$

$$[22\% < w_{ESTUFA} < 415\%] \quad (4.10)$$

$$r = 0.99993$$

En la Fig 4.7 se recogen los datos correspondientes a los valores de los contenidos de agua para ambas técnicas, la recta de correlación y las curvas que limitan el intervalo de confianza, para un nivel de confianza $(1-\alpha) = 98\%$.

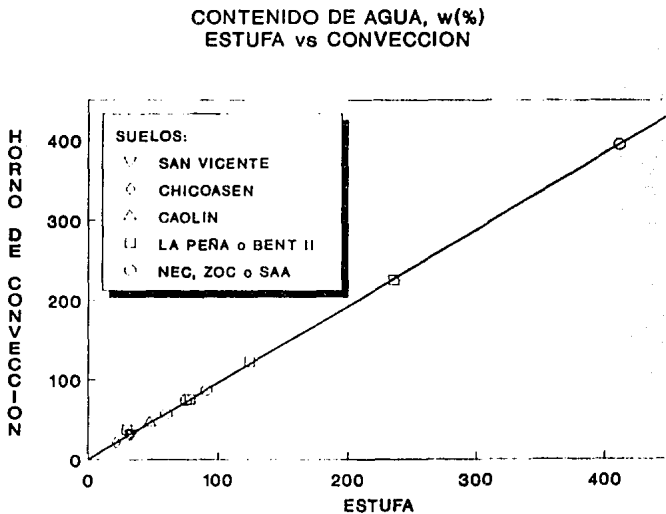


Fig 4.7 Correlación entre los contenidos de agua para diferentes suelos, secados en la estufa y HC

4.4.3 Técnica del alcohol - horno de convección

Los resultados correspondientes en ambas técnicas aparecen en la Tabla 4.4, junto con los parámetros definidos en tablas similares.

Tabla 4.4 Contenidos de agua para diferentes suelos secados con la técnica del alcohol y HC

Suelo		w(%) HC y	Tiempo (hrs)	w(%) Alcohol x	Tiempo (min)	DIF	DIF/w _{HC} (%)	y _{reg}
1	CHICOASEN (SC)	21.45	23	20.75	19	-0.70	-3.26340	21.7357
2	SAN VICENTE (SM)	31.54	23	31.57	31	0.03	0.09512	32.2567
3	CHICOASEN (SC)	31.65	23.5	30.81	20	-0.84	-2.65403	31.5177
4	SAN VICENTE (SM)	32.60	23.3	32.29	25	-0.31	-0.95092	32.9568
5	LA PEÑA (CH)	37.44	23.5	37.72	43	0.28	0.74786	38.2368
6	CAOLIN (CL)	46.43	23.5	46.75	38	0.32	0.68921	47.0173
7	NECAXA (MH)	56.54	23	57.52	31	0.98	1.73329	57.4897
8	NECAXA (MH)	74.06	23	73.99	32	-0.07	-0.09452	73.5046
9	LA PEÑA (CH)	75.59	24	75.52	40	-0.07	-0.09260	74.9923
10	ZOCALO	86.42	23.5	86.60	39	0.18	0.20829	85.7662
11	BENTONITA II (CH)	122.37	23	122.73	40	0.36	0.29419	120.8979
12	BENTONITA II (CH)	225.47	23.75	228.59	43	3.12	1.38378	223.8330
13	SAN ANTONIO ABAD	394.48	23	405.48	51	11.00	2.78848	395.8354
Salida de Regresión:					val.mín	-0.84	-3.2634%	
Constante		1.558985			val.máx	11.00	2.7884%	
Err Estándar Est Y		0.972294			val.med	1.0984	0.0680%	
R Cuadrado		0.999922						
No. de Observaciones			13					
Grados de Libertad			11					
R			0.999961					
Coeficiente de X		0.97237						
Err Estándar de Coef.		0.00259						

Generalmente los w% alcanzados con la técnica del alcohol son mayores al del HC, como puede observarse en la misma tabla; la diferencia media es de +1.098%, y la máxima diferencia que se tiene es para el suelo MH-San Antonio Abad.

Con lo que respecta a la recta de correlación para ambos contenidos de agua es la siguiente y en la Fig 4.8 se compara los resultados del w% de ambas técnicas.

$$w_{HC} = 0.9724w_{ALCOHOL} + 1.55895$$

$$[20\% < w_{ALCOHOL} < 410\%]$$

(4.11)

$$r = 0.99996$$

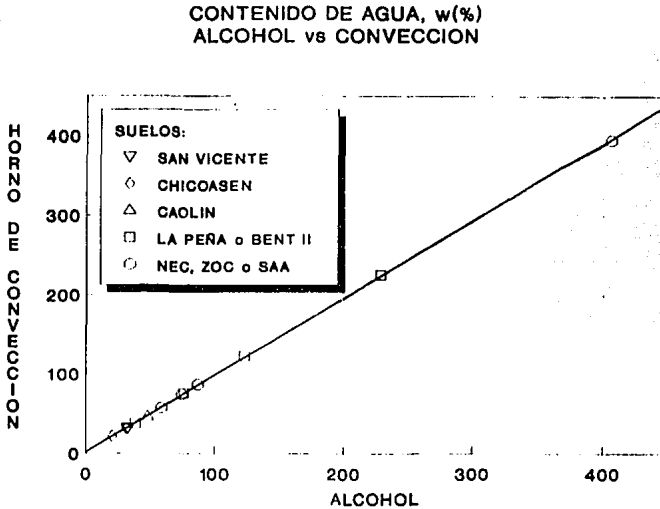


Fig 4.8 Correlación entre los contenidos de agua para diferentes suelos, obtenidos con la técnica del alcohol y HC

Para el uso de esta técnica es necesario estimar la cantidad de alcohol a utilizar, para ello se presenta la Fig 4.9 que contiene el peso de agua de los suelos secados, la cantidad de alcohol que se necesitó, además de la correlación entre estos pesos cuya expresión resulta ser:

$$W_{ALCOHOL} = 3.16W_{agua}$$

(4.12)

El ajuste es burdo, pero proporciona una regla práctica para determinar en forma aproximada la cantidad de alcohol a utilizar en el secado de una muestra de suelo. Para su uso se debe estimar la cantidad de agua en gramos y al multiplicarla por 3 (que es aproximadamente el valor de la

pendiente de la recta) proporcionará la cantidad mínima del alcohol requerido. El peso total del alcohol estimado puede agregarse en diferentes cantidades para su combustión y que permitan secar el suelo gradualmente; en este estudio las cantidades iniciales fueron de 10 y 15 g y sucesivamente de 5 g. El comportamiento típico del secado se puede observar en la Fig 4.10.

TECNICA DEL ALCOHOL PESO DE AGUA vs PESO DE ALCOHOL

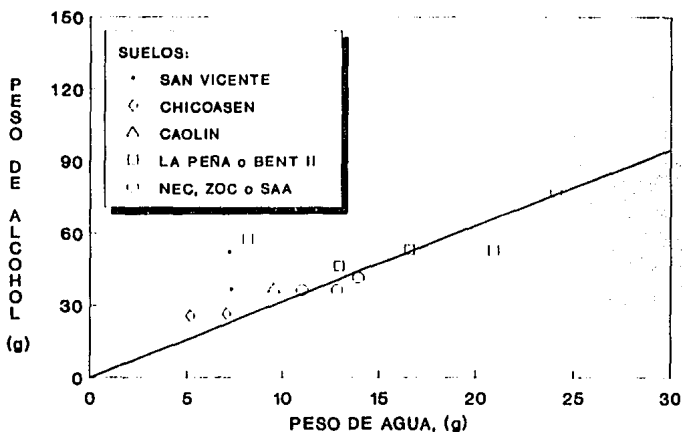


Fig 4.9 Ajuste para el peso de agua y peso de alcohol

Tomando en cuenta que la ecuación (4.11) se considera válida para muestras con PHI de 30 g, se demuestra que no se requieren grandes cantidades de suelo [100 g, según Antrim, J. D., et al, (1970)] para ser secado y de que la ecuación (4.12) proporciona la cantidad de alcohol estimada para toda la prueba en función directa del peso de agua que contiene el suelo. La referencia anterior establece que para cada combustión se requieren aproximadamente 40 g de alcohol (1.5 onza) para 100 g de suelo, pero no especifica la cantidad de alcohol para toda la prueba.

En la figura anterior se aprecia el comportamiento del secado de una muestra del suelo Necaxa (MH) con PHI de 30 g. Inicialmente se le incluyó 15 g de alcohol par su combustión. Teniendo la suma de ambos pesos en la lata (45.76 g), se colocó en la balanza, previamente equipada para que no sufriera daño por el calentamiento de la lata durante la combustión, para registrar el decremento del PHI. La primera combustión requirió de 11 minutos para finalmente obtener un peso de la muestra de 21.97 g y un contenido de agua de 32%. Para cada una de las sucesivas combustiones se añadió aproximadamente 5 g de alcohol.

COMPORTAMIENTO DE SECADO
 POR COMBUSTION DE ALCOHOL
 NECAXA (MH)

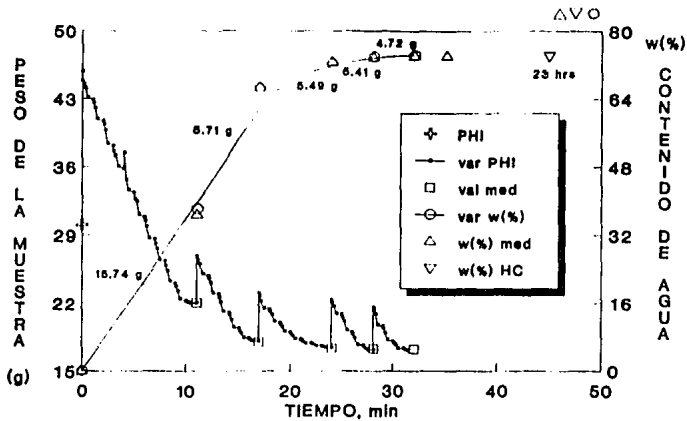


Fig 4.10 Comportamiento del secado de una muestra de suelo con alcohol

El valor de la diferencia del PHI y la ordenada final de cada combustión, es la pérdida de agua que se tiene. esta diferencia tiende a ser constante para un cierto número de combustiones.

4.4.4 Técnica del tolueno - horno de convección

Para mostrar la comparación de los resultados del w% obtenidos en ambas técnicas, en la Tabla 4.5 se resumen.

De igual forma que en las técnicas anteriores, puede compararse la diferencia diciendo lo siguiente: la diferencia relativa media es negativa (-1.4273%) lo que demuestra que el contenido de agua que se obtiene usando el tolueno es generalmente menor al del HC ($w_{\text{TOLUENO}} < w_{\text{HC}}$).

La ecuación de la recta de correlación es la siguiente:

$$w_{\text{HC}} = 1.0179w_{\text{TOLUENO}} - 0.30263$$

$$[21\% < w_{\text{TOLUENO}} < 390\%]$$

$$r = 0.99990$$
(4.13)

La Fig 4.11 compara los datos de ambos contenidos de agua para ambas técnicas, se incluye la recta de regresión y las curvas del intervalo de confianza.

Tabla 4.5 Contenidos de agua para diferentes suelos secados con la técnica del tolueno y HC

Suelo		w(%) HC y	Tiempo (hrs)	w(%) Tolueno x	Tiempo (min)	DIF	DIF/w _{HC} (%)	y _{reg}
1	CHICOASEN (SC)	21.45	23	21.09	28	-0.36	-1.67832	21.1647
2	SAN VICENTE (SM)	31.54	23	32.01	24	0.47	1.49017	32.2801
3	CHICOASEN (SC)	31.65	23.5	31.87	30	0.22	0.69510	32.1375
4	SAN VICENTE (SM)	32.60	23.3	31.72	31	-0.88	-2.69939	31.9849
5	LA PEÑA (CH)	37.44	23.5	36.36	26	-1.08	-2.88462	36.7079
6	CAOLIN (CL)	46.43	23.5	45.46	37	-0.97	-2.08917	45.9707
7	NECAXA (MH)	56.54	23	54.65	31	-1.89	-3.34277	55.3251
8	NECAXA (MH)	74.06	23	72.17	48	-1.89	-2.55198	73.1585
9	LA PEÑA (CH)	75.59	24	73.92	41	-1.67	-2.20929	74.9399
10	ZOCALO	86.42	23.5	85.48	27	-0.94	-1.08771	86.7067
11	BENTONITA II (CH)	122.37	23	122.55	43	0.18	0.14709	124.4399
12	BENTONITA II (CH)	225.47	23.75	225.21	51	-0.26	-0.11531	228.9366
13	SAN ANTONIO ABAD	394.48	23	385.69	43	-8.79	-2.22825	392.2877
Salida de Regresión:					val. mín	-8.79	-3.3427%	
Constante					val. máx	0.47	1.4901%	
Err Estándar Est Y					val. med	-1.374	-1.4273%	
R Cuadrado		0.99980						
No. de Observaciones			13					
Grados de Libertad			11					
R			0.99990					
Coeficiente de X		1.01789						
Err Estándar de Coef.		0.00428						

La correlación que *Ellstein (1982)* obtuvo al secar 89 muestras de cuatro diferentes suelos (descritos como *tepetate*, *arcilla* y dos diferentes *limo-arenosos*) es:

$$w_{\text{TOLUENO}} = 1.0002w_{\text{HC}} - 0.175$$

$$[30\% < w_{\text{HC}} < 225\%] \quad (4.14)$$

$$r = 0.99543$$

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

CONTENIDO DE AGUA, w(%)
TOLUENO vs CONVECCION

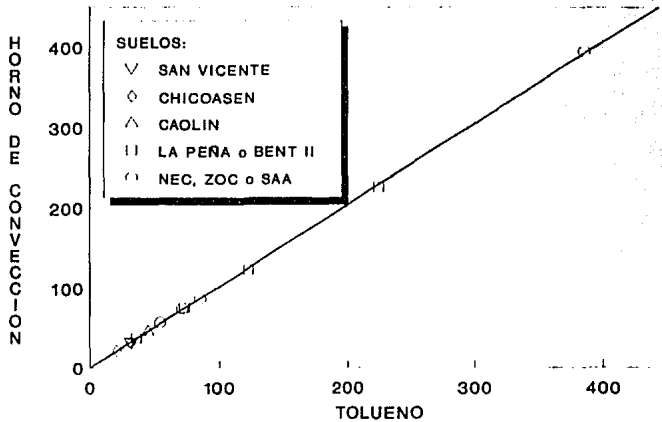


Fig 4.11 Correlación entre los contenidos de agua para diferentes suelos, para la técnica del tolueno y HC

Si la correlación se hace de tal forma que los pares ordenados sean $(x, y) = (w_{TOLUENO}, w_{HC})$, se obtiene que:

$$w_{HC} = 0.9904w_{TOLUENO} + 0.99438$$

$$[30\% < w_{HC} < 225\%] \quad (4.15)$$

$$r = 0.99543$$

Para fines prácticos se considera que los resultados que se obtienen al usar las ecuaciones (4.13) y (4.15) son iguales, de la misma forma si se utiliza el HC.

Resulta claro que la técnica del tolueno es aplicable a la mayoría de los suelos, tanto en el estudio de *Ellstein* como en esta investigación no se incluyeron suelos orgánicos o con alto contenido de ferromagnesianos por lo que cabría estudiarlos.

La comparación de las curvas de secado de las diferentes técnicas se muestra en la Fig 4.12; se aprecia que con el HMO se requiere poco tiempo para alcanzar el peso seco del material, en comparación con la técnica del tolueno. En la estufa, el tiempo es menor en relación al que corresponde con la del alcohol, pero es mayor comparándolo con el requerido con el HMO. El mismo orden se observó para los diferentes suelos restantes.

**CURVAS DE SECADO
TECNICAS DE SECADO
SUELO NECAXA (MH)**

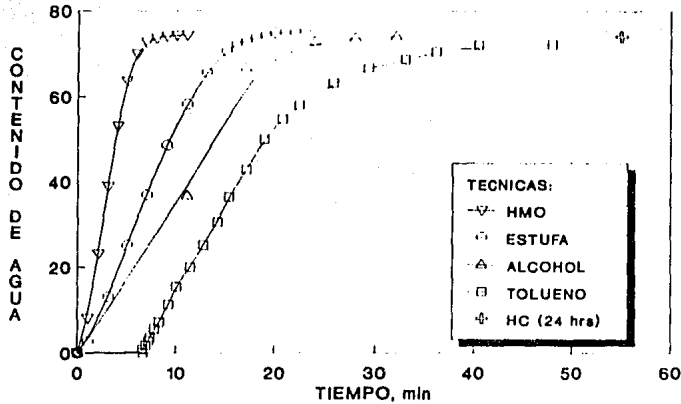


Fig 4.12 Comparación de las curvas de secado obtenidas con las diferentes técnicas de secado para el suelo Necaxa (MH)

4.5 Análisis de la variabilidad de los resultados en cada técnica

En la práctica es deseable establecer reglas sencillas para su uso frecuente; en el caso de las correlaciones entre los contenidos de agua para las técnicas anteriores y el HC podría enunciarse una regla sencilla de la siguiente forma: "el contenido de agua de un suelo que se obtiene con la técnica x deberá ser multiplicado por el factor k_x para obtener el correspondiente al HC". Lo anterior es posible si las rectas de regresión pasan por el origen del sistema coordenado, en donde k_x es la pendiente de la recta, realizando los cálculos se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$w_{HC} = 0.9724w_{ALCOHOL}$$

$$[20\% < w_{ALCOHOL} < 410\%] \quad (4.16)$$

$$r = 0.99996$$

$$w_{HC} = 0.9583w_{ESTUFA}$$

$$[22\% < w_{ESTUFA} < 415\%] \quad (4.17)$$

$$r = 0.99993$$

$$w_{HC} = 1.0015w_{HMO}$$

$$[21\% < w_{HMO} < 395\%] \quad (4.18)$$

$$r = 0.99990$$

$$w_{HC} = 1.0179w_{TOLUENO}$$

$$[21\% < w_{TOLUENO} < 350\%] \quad (4.19)$$

$$r = 0.99990$$

Puede notarse que prácticamente ambas rectas de regresión, aquella que no pasa por el origen y la que es forzada a pasar, para una misma técnica, no cambian notablemente y de igual manera los coeficientes de correlación.

La técnica del alcohol y de la estufa son las que tienen más alto el coeficiente de correlación y parece que son las más *confiables*.

Analizando la variabilidad de los resultados para todas las técnicas puede llegarse a conclusiones novedosas, (tablas 4.6 a 4.10). Es en muchas ocasiones útil establecer un parámetro que defina la variabilidad de las observaciones realizadas o resultados obtenidos de un fenómeno bajo un ambiente de experimentación. El primer parámetro que puede definirse es el *rango* como la diferencia entre los valores máximo y mínimo observados. El parámetro que comúnmente se usa es la *variancia de la muestra*, σ_x^2 (ec. 4.20), o bien la *desviación estándar* σ_x (ec. 4.21). La variancia es una medida de la dispersión o variación de los valores observados, si los valores tienden a concentrarse alrededor de la media (\bar{x}), la variancia es pequeña; en tanto que si los valores tienden a distribuirse lejos de la media, la variación es grande. Para la desviación estándar, mientras su valor sea menor, los valores de la muestra tienden a concentrarse alrededor de su media. Si se desea comparar las desviaciones relativas de varios grupos de datos, es conveniente usar el coeficiente de variación de la muestra ν_x (ec. 4.22).

Tabla 4.6 Variabilidad de los contenidos de agua de cuatro muestras para diferentes suelos, secados en el HC

No.	Suelo	Horno de convección Contenido de agua, w(%)			Peso de agua (g)	σ_s^2	σ_s	ν_s (%)
		val.med	rango	rango/ val.med				
1	CHICOASEN (SC)	21.45	0.15	0.6994	5.30	0.00396	0.06292	0.29335
2	SAN VICENTE (SM)	31.54	0.23	0.7293	7.19	0.01223	0.11057	0.35059
3	CHICOASEN (SC)	31.65	0.40	1.2637	7.21	0.03789	0.19466	0.61498
4	SAN VICENTE (SM)	32.60	0.23	0.7056	7.37	0.01203	0.10970	0.33654
5	LA PEÑA (CH)	37.44	0.51	1.3622	8.17	0.05967	0.24427	0.65242
6	CAOLIN (CL)	46.43	0.07	0.1508	9.51	0.00123	0.03500	0.07539
7	NECAXA (MH)	56.54	0.57	1.0082	10.84	0.06429	0.25356	0.44848
8	NECAXA (MH)	74.06	0.31	0.4186	12.76	0.01769	0.13301	0.17959
9	LA PEÑA (CH)	75.59	0.51	0.6747	12.91	0.04502	0.21219	0.28070
10	ZOCALO	86.42	0.69	0.7984	13.91	0.09196	0.30325	0.35089
11	BENTONITA II (CH)	122.37	0.66	0.5394	16.51	0.10283	0.32068	0.26207
12	BENTONITA II (CH)	225.47	1.06	0.4701	20.78	0.27973	0.52890	0.23458
13	SAN ANTONIO ABAD	394.48	0.82	0.2079	23.93	0.15209	0.38999	0.09886
					val.med	0.06774	0.22297	0.3214%

Tabla 4.7 Variabilidad de los contenidos de agua de cuatro muestras para diferentes suelos, secados en el HMO

No.	Suelo	Horno de microondas Contenido de agua, w(%)			Peso de agua (g)	σ_s^2	σ_s	ν_s (%)
		val.med	rango	rango/ val.med				
1	CHICOASEN (SC)	21.46	0.20	0.9320	5.30	0.00833	0.09129	0.42538
2	SAN VICENTE (SM)	30.70	0.17	0.5538	7.05	0.00577	0.07594	0.24740
3	CHICOASEN (SC)	31.06	0.46	1.4809	7.11	0.04409	0.20998	0.67599
4	SAN VICENTE (SM)	32.42	0.35	1.0795	7.35	0.03063	0.17500	0.53975
5	LA PEÑA (CH)	36.63	0.68	1.8567	8.04	0.09503	0.30827	0.84171
6	CAOLIN (CL)	45.91	0.43	0.9366	9.44	0.03082	0.17557	0.38240
7	NECAXA (MH)	56.23	0.40	0.7114	10.80	0.03147	0.17739	0.31547
8	NECAXA (MH)	74.35	0.30	0.4035	12.79	0.01583	0.12583	0.16925
9	LA PEÑA (CH)	74.98	0.61	0.8136	12.85	0.07236	0.26900	0.35877
10	ZOCALO	86.16	0.58	0.6732	13.88	0.05847	0.24180	0.28064
11	BENTONITA II (CH)	123.58	0.26	0.2104	16.58	0.01209	0.10996	0.08898
12	BENTONITA II (CH)	228.95	1.08	0.4717	20.88	0.25920	0.50912	0.22237
13	SAN ANTONIO ABAD	391.45	3.22	0.8226	23.90	2.25130	1.50043	0.38331
					val.med	0.22426	0.30535	0.3793%

Tabla 4.8 Variabilidad de los contenidos de agua de cuatro muestras para diferentes suelos, secados en la estufa

No.	Suelo	Secado en la estufa Contenido de agua, w(%)			Peso de agua (g)	σ_s^2	σ_s	ν_s (%)
		val.med	rango	rango/ val.med				
1	CHICOASEN (SC)	22.01	0.35	1.5900	5.41	0.02229	0.14930	0.67827
2	SAN VICENTE (SM)	33.32	0.71	2.1312	7.50	0.08937	0.29894	0.89732
3	CHICOASEN (SC)	31.99	0.99	3.0950	7.27	0.24183	0.49176	1.53734
4	SAN VICENTE (SM)	34.76	0.57	1.6379	7.74	0.07102	0.26651	0.76665
5	LA PEÑA (CH)	40.38	0.40	0.9907	8.63	0.03569	0.18892	0.46789
6	CAOLIN (CL)	47.49	0.43	0.9054	9.66	0.03783	0.19449	0.40951
7	NECAXA (MH)	59.74	5.17	8.6538	11.22	4.49222	2.11949	3.54770
8	NECAXA (MH)	75.06	1.12	1.4922	12.86	0.21657	0.46537	0.62003
9	LA PEÑA (CH)	77.96	1.48	1.8983	13.14	0.45876	0.67732	0.86877
10	ZOCALO	90.97	1.09	1.1983	14.29	0.26483	0.51462	0.56573
11	BENTONITA II (CH)	124.77	2.78	2.2282	16.65	1.67477	1.29413	1.03275
12	BENTONITA II (CH)	236.09	1.51	0.6369	21.07	0.50780	0.71260	0.30183
13	SAN ANTONIO ABAD	411.42	5.08	1.2348	24.13	5.67529	2.38229	0.57904
					val.med	1.06064	0.75044	0.9444%

Tabla 4.9 Variabilidad de los contenidos de agua de cuatro muestras para diferentes suelos, secados con la técnica del alcohol

No.	Suelo	Técnica del alcohol Contenido de agua, w(%)			Peso de agua (g)	σ_s^2	σ_s	ν_s (%)
		val.med	rango	rango/ val.med				
1	CHICOASEN (SC)	20.75	0.24	1.1568	5.15	0.01303	0.11413	0.55008
2	SAN VICENTE (SM)	31.57	0.28	0.8871	7.20	0.01577	0.12557	0.39780
3	CHICOASEN (SC)	30.81	0.34	1.1036	7.07	0.02229	0.14930	0.48464
4	SAN VICENTE (SM)	32.29	0.29	0.8982	7.32	0.01449	0.12038	0.37284
5	LA PEÑA (CH)	37.72	0.06	0.1591	8.22	0.00083	0.02872	0.07615
6	CAOLIN (CL)	46.75	0.07	0.1497	9.56	0.00123	0.03500	0.07486
7	NECAXA (MH)	57.52	0.74	1.2865	10.96	0.10169	0.31889	0.55438
8	NECAXA (MH)	73.99	1.61	2.1760	12.76	0.45553	0.67493	0.91219
9	LA PEÑA (CH)	75.52	0.30	0.3973	12.91	0.02250	0.15000	0.19864
10	ZOCALO	86.60	0.58	0.6697	13.92	0.09253	0.30419	0.35126
11	BENTONITA II (CH)	122.73	1.14	0.9288	16.53	0.27883	0.52804	0.43024
12	BENTONITA II (CH)	228.59	2.52	1.1024	20.87	1.12320	1.05981	0.46363
13	SAN ANTONIO ABAD	405.48	2.39	0.5894	24.06	1.03990	1.01975	0.25150
					val.med	0.24475	0.35606	0.3937%

Tabla 4.10 Variabilidad de los contenidos de agua de cuatro muestras para diferentes suelos, secados con la técnica del tolueno

No.	Suelo	Técnica del tolueno Contenido de agua, w(%)			Peso de agua (g)	σ_x^2	σ_x	v_x (%)
		val.med	rango	rango/ val.med				
1	CHICOASEN (SC)	21.09	0.49	2.3231	5.23	0.06003	0.24500	1.16155
2	SAN VICENTE (SM)	32.01	0.59	1.8599	7.27	0.08509	0.29170	0.91955
3	CHICOASEN (SC)	31.87	1.16	3.6398	7.25	0.33640	0.58000	1.81989
4	SAN VICENTE (SM)	31.72	0.60	1.8747	7.22	0.08457	0.29080	0.90862
5	LA PEÑA (CH)	36.36	0.00	0.0000	8.00	0.00000	0.00000	0.00000
6	CAOLIN (CL)	45.46	0.70	1.5400	9.38	0.12250	0.35000	0.76999
7	NECAXA (MH)	54.65	4.00	7.3200	10.60	2.98137	1.72666	3.15978
8	NECAXA (MH)	72.17	2.96	4.1014	12.58	1.53707	1.23978	1.71787
9	LA PEÑA (CH)	73.92	1.01	1.3664	12.75	0.34003	0.58312	0.78891
10	ZOCALO	85.48	1.15	1.3454	13.83	0.33063	0.57500	0.67269
11	BENTONITA II (CH)	122.55	3.56	2.9049	16.52	2.79606	1.67215	1.36444
12	BENTONITA II (CH)	225.21	3.51	1.5585	20.78	3.08002	1.75500	0.77926
13	SAN ANTONIO ABAD	385.69	7.91	2.0509	23.82	13.5423	3.67999	0.95412
					val.med	1.94585	0.99917	1.1551%

$$\sigma_x^2 = \frac{S_{xx}}{N - 1} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1} \quad (4.20)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2} \quad (4.21)$$

$$v_x = \frac{\sigma_x}{\bar{x}} \quad (4.22)$$

De las cinco técnicas de secado, en el HC se tienen los valores más bajos tanto de la variancia como del coeficiente de correlación, 0.0677 y 0.3214% respectivamente. En cambio, en la técnica del tolueno, se tienen los más altos, la variancia es más significativa (1.9458) lo que indica que es mayor la dispersión de los resultados obtenidos de muestras de un mismo suelo sujetas a un mismo ambiente de secado con respecto a su media.

En general, se tiene mayor variancia en suelos inorgánicos con alta plasticidad (Bentonita II) y en la arcilla típica de la ciudad de México (San Antonio Abad-MH).

La Fig 4.13 se muestran los resultados del $w(\%)$ y de la diferencia relativa en % (rango/val.med.) observándose que para contenidos de agua menores ésta última crece. En las técnicas del tolueno y de la estufa es más marcada dicha tendencia.

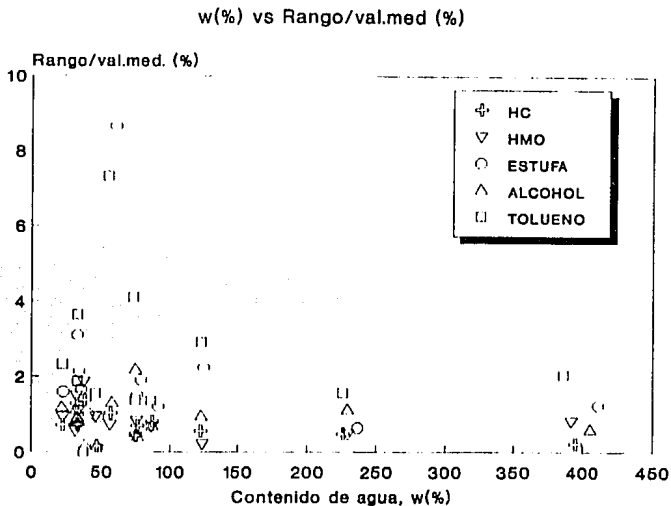


Fig 4.13 Contenido de agua vs diferencia relativa (%), para las diferentes técnicas de secado

La comparación de las diferencias relativas obtenidas en el HC con las técnicas restantes se presenta en la Fig 4.14. La mayor variabilidad se tiene en la técnica del tolueno, con respecto al HC, y la menor con el uso del HMO.

Con lo anterior se demuestra que no necesariamente se obtendrán valores idénticos de contenido de agua haciendo uso de las diferentes técnicas, aun si las muestras de suelo formaran parte de una mezcla *homogénea*.

Las técnicas se ordenan como sigue, de acuerdo al valor menor de la desviación estándar o el coeficiente de variación de los resultados obtenidos:

1. Horno de convección
2. Horno de microondas
3. Técnica del alcohol
4. Técnica del secado intensivo en estufa
5. Técnica del tolueno

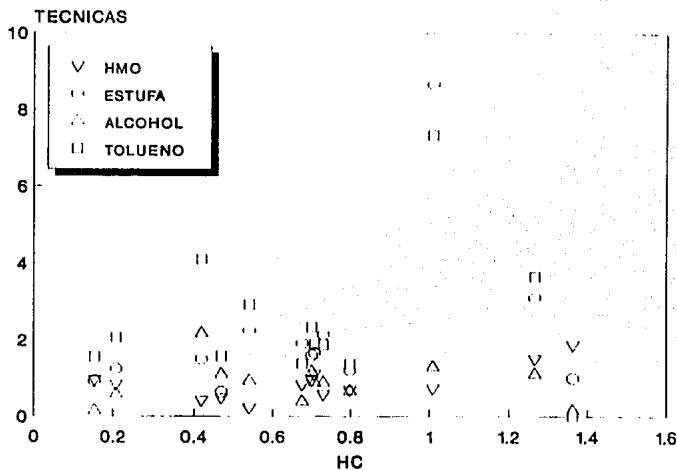


Fig 4.14 Diferencias relativas en (%) de las técnicas de secado respecto al HC

La lista anterior toma en cuenta la variabilidad de los resultados que pueden obtenerse en ellas. Existen otros factores que intervienen en la decisión para adoptar alguna de ellas en un trabajo específico; entre éstas se encuentran: la facilidad de operación, la productividad de resultados (en función del tiempo necesario para reportar los resultados del contenido de agua), el costo del equipo, disponibilidad de equipo, necesidad de mayor o menor adiestramiento de los operadores y la depreciación del equipo mismo.

En lo que se refiere a la facilidad de operación puede establecerse la siguiente lista, de acuerdo a la experiencia de quien escribe:

1. Horno de convección
2. Horno de microondas
3. Técnica del secado intensivo en estufa
4. Técnica del tolueno
5. Técnica del alcohol

El uso del HMO permite obtener una gran productividad de resultados en poco tiempo, con gran facilidad y correlación bastante fuerte con HC. En el capítulo 7 se comenta más ampliamente ésta técnica.

5. DETERMINACIONES DEL CONTENIDO DE AGUA CON EL HORNO DE CONVECCION Y EL DE MICROONDAS

En este capítulo se presentan programas experimentales llevados a cabo para establecer la factibilidad del uso del HMO y su correlación con el HC.

5.1 Determinación del comportamiento de las curvas de secado para diferentes PHI y niveles de potencia del HMO.

Este programa de pruebas se llevó a cabo sobre caolín adquirido comercialmente y cuyas propiedades índice son: $w_1 = 47.30\%$ y $PI = 26.90\%$.

La determinación del comportamiento de las curvas de secado para diferentes PHI y diferentes potencias de secado, fue el estudiado en este programa. Los PHI utilizados son los que comúnmente se utilizan para determinar el contenido de agua, ya sea en campo o en laboratorio, los cuales son: 5, 10, 20, 30 y 50 g. Las características del HMO pueden verse en el inciso 4.2.2, las potencias que se utilizaron fueron las siguientes: 4, 6, 8 y 10.

Cabe aclarar que todos los PHI se tomaron de una mezcla homogénea con un contenido de agua promedio de 50.65% y los valores que se reportan son el promedio de 4 determinaciones obtenidas simultáneamente en cada horno.

5.1.1 Curvas de secado

A la variación del $w(\%)$ de una muestra con el tiempo se le ha llamado *curva de secado*, Fig 5.1. Pueden distinguirse 3 zonas importantes en dicha curvas; en la primera se inicia el calentamiento de la muestra con poca pérdida de agua por evaporación; en la segunda, la evaporación del agua se incrementa en poco tiempo y por lo tanto la disminución del peso de la muestra; finalmente la muestra tiende a alcanzar un peso constante y por lo tanto un $w(\%)$ final.

CURVA DE SECADO TÍPICA OBTENIDA EN HMO

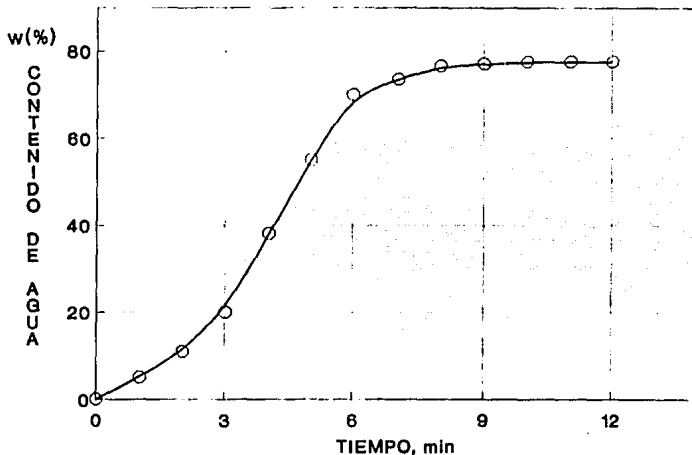


Fig 5.1 Curva de secado típica que se obtiene al usar el HMO

En este trabajo se usa como definición de peso constante de la muestra cuando la diferencia entre dos pesadas de la misma muestra es igual a 0.01 g y que finalmente resulta ser el W_s de la ecuación (2.1). La variación del $w(\%)$ de cuatro muestras se presenta en la Fig 5.2, en donde la línea continua indica el valor medio de las cuatro determinaciones. La diferencia entre el valor máximo y mínimo se define como el rango y corresponde a las líneas punteadas; se observa que en los primeros minutos el rango crece y disminuye durante la etapa final.

En las figuras 5.3 a 5.7 se puede ver el comportamiento de las curvas de secado, tanto para los diferentes PHI así como las potencias utilizadas. En general se observa que a menor potencia se requiere mayor tiempo para obtener el $w(\%)$ final.

Los resultados de las muestras secadas se presentan en la Tabla 5.1, donde se incluye el PHI, las potencias de secado utilizadas, el w_{HC} , w_{HMO} y el tiempo que se requirió para alcanzar el peso seco.

**CURVA DE SECADO MEDIA
CUATRO DETERMINACIONES
SUELO NECAXA-MH**

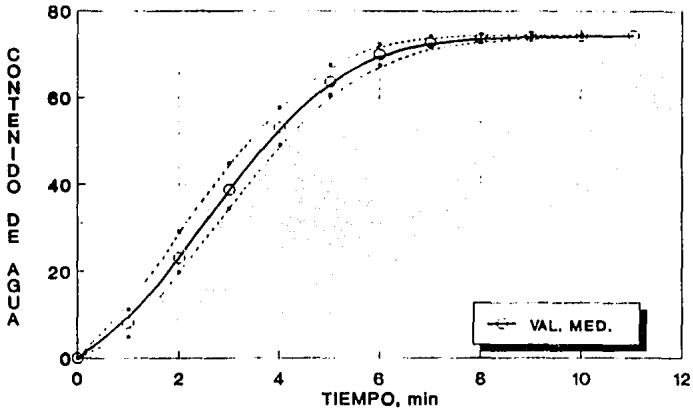


Fig 5.2 Curva de secado promedio de cuatro determinaciones simultáneas

**CURVAS DE SECADO PARA 5 g
HORNO DE MICROONDAS
SUELO CAOLIN**

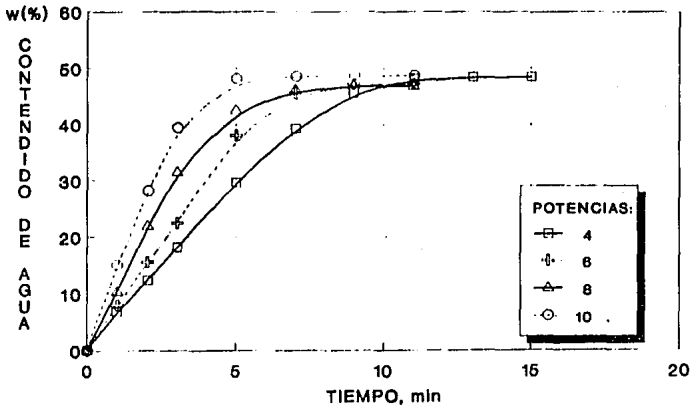


Fig 5.3 Curvas de secado para PHI de 5 g y potencias diferentes del HMO, suelo caolín

CURVAS DE SECADO PARA 10 g
HORNO DE MICROONDAS
SUELO CAOLIN

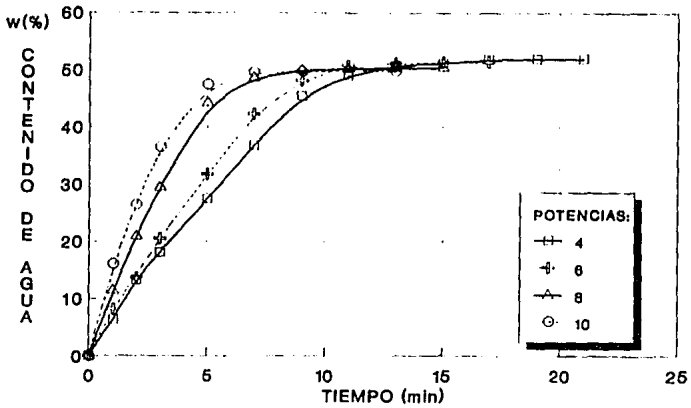


Fig. 5.4 Curvas de secado para PHI de 10 g y potencias diferentes del HMO, suelo caolín

CURVAS DE SECADO PARA 20 g
HORNO DE MICROONDAS
SUELO CAOLIN

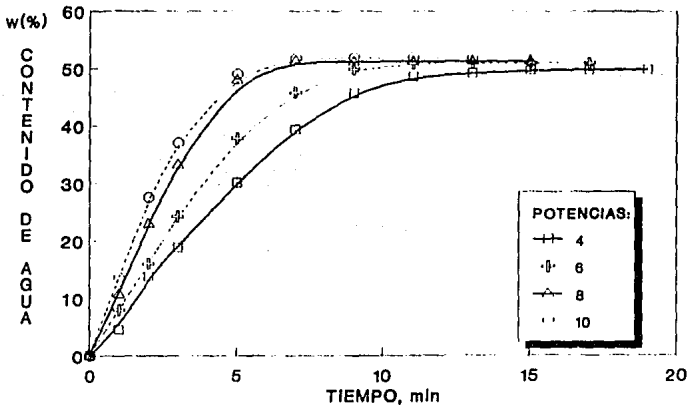


Fig. 5.5 Curvas de secado para PHI de 20 g y potencias diferentes del HMO, suelo caolín

CURVAS DE SECADO PARA 30 g
HORNO DE MICROONDAS
SUELO CAOLIN

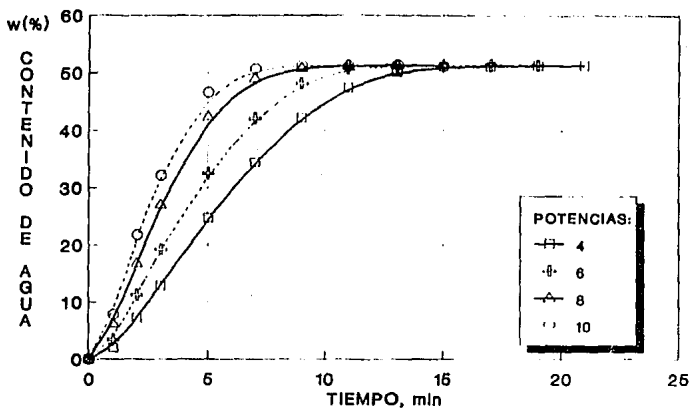


Fig. 5.6 Curvas de secado para PHI de 30 g y potencias diferentes del HMO, suelo caolín

CURVAS DE SECADO PARA 50 g
HORNO DE MICROONDAS
SUELO CAOLIN

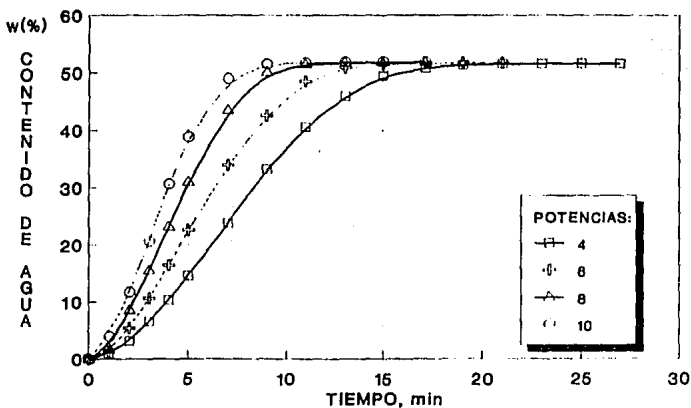


Fig. 5.7 Curvas de secado para PHI de 50 g de caolín con diferentes de secado del HMO

Tabla 5.1 Contenido de agua obtenidos en el HC y HMO para diferentes PHI y potencias de secado

PHI (g)	Potencia 4			Potencia 6			Potencia 8			Potencia 10		
	w_{HC} (%)	w_{HMO} (%)	t (min)	w_{HC} (%)	w_{HMO} (%)	t (min)	w_{HC} (%)	w_{HMO} (%)	t (min)	w_{HC} (%)	w_{HMO} (%)	t (min)
5	48.26	48.36	11	47.75	47.17	9	46.45	46.89	8	48.47	48.63	7
10	51.46	50.88	13.5	51.59	50.37	11	50.47	50.40	8.5	50.19	50.27	7.5
20	50.30	49.80	13	51.36	50.93	13	51.58	51.26	9	51.78	51.76	8
30	51.46	51.32	17	51.36	51.36	15	51.42	51.28	12	51.29	51.26	9
50	51.95	51.52	24	51.62	51.62	19	51.86	51.68	15	51.87	51.78	13

La Fig 5.8 presenta la relación de tiempo-PHI para las diferentes potencias y puede verse más claramente que el tiempo necesario para obtener el $w(\%)$ en el HMO se incrementa cuando la potencia es menor y el PHI crece.

CURVAS TIEMPO VS PHI
SUELO CAOLIN

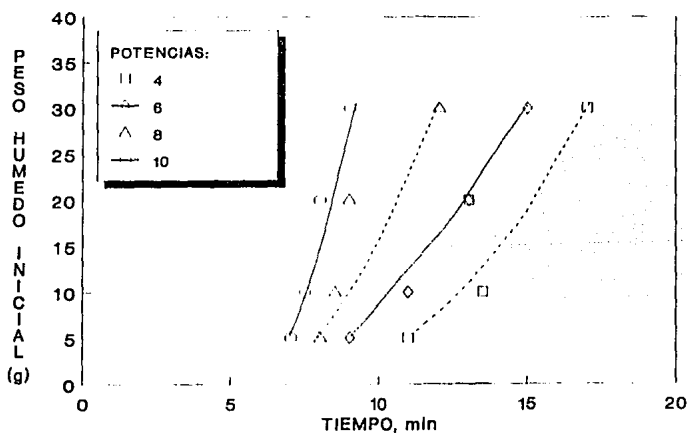


Fig 5.8 Tiempo requerido para alcanzar el $w(\%)$ en función de la potencia del HMO y PHI, suelo caolín

Si para cada PHI de la figura anterior se cambian por su respectivo peso de agua, w_w , se obtiene la Fig 5.9. La idea de presentar esta figura es para mostrar que el tiempo requerido para alcanzar el peso seco esta determinado por la cantidad de agua que contenga la muestra.

**CURVAS TIEMPO VS Ww
SUELO CAOLIN**

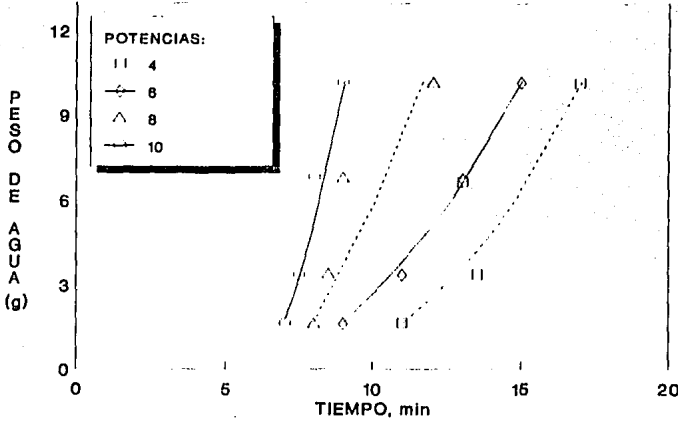


Fig 5.9 Tiempo requerido para alcanzar el w(%) en función de la potencia usada en HMO y del peso de agua en gramos, suelo caolín

5.2 Secado de Caolín y Bentonita I con diferentes PHI en el HC y HMO

Los objetivos de este programa se encaminaron a definir si para grandes cantidades de masa húmeda inicial, entre 100 y 200 g, se tiene una menor variabilidad del contenido de agua de las muestras secadas en ambos hornos y si es justificable secar muestras en el HMO con mas de 100 g de PHI para obtener el w_L y w_p con las cantidades de PHI usuales en dichas pruebas.

5.2.1 Materiales usados

Los materiales son suelos adquiridos comercialmente en polvo y el número de mezclas fueron tres:

1. Caolín con un w(%) medio de 38.87 (0.82 w_L y 1.90 w_p)
2. Bentonita I M1 con un w(%) medio de 38.41 (0.18 w_L y 1.13 w_p)
3. Bentonita I M2 con un w(%) medio de 205.78 (0.83 w_L y 6.05 w_p)

Caolín:	$w_L = 47.30\%$	$w_p = 20.40\%$
Bentonita I:	$w_L = 248.00\%$	$w_p = 34.00\%$

Gilbert (1991) recomienda que el PHI para ser secado en el HMO que describe debe estar comprendido entre 100 y 200 g, indicando además que con especímenes con peso mayor de 80 g

se tiene un error meramente casual. La recomendación que *Gilbert* hace no puede llevarse a cabo cuando se requiere obtener el límite líquido y límite plástico de los suelos dado que se dispone de poco material durante dichas pruebas, poco menos de 8 g para cada determinación.

Para confirmar o rechazar lo expuesto por *Gilbert*, el programa experimental contempló secar muestras con PHI de 5, 15, 30, 50, 100, 150 y 200 g de cada mezcla de material en ambos hornos. Se secaron cuatro muestras para cada PHI y horno, teniendo un gran total de muestras secadas de ambos hornos de 168. El valor que se reporta de los contenidos de agua son valores medios de las cuatro muestras secadas en cada ensaye.

5.2.2 Procedimiento de secado

Para las muestras secadas en el HC se siguió lo marcado en la norma ASTM D2216-90 y para el HMO las muestras se secaron con intervalos de tiempo, de 1 a 6 minutos, según lo requerido para alcanzar el peso seco con potencia de 10.

5.2.3 Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos de los contenidos de agua para cada mezcla y PHI se presentan en la Tabla 5.2.

En la Tabla 5.3 se resumen los resultados siguientes: tiempo requerido para alcanzar el peso seco, la diferencia entre los contenidos de agua ($DIF = w_{HMO} - w_{HC}$), la diferencia relativa [$DIF/w(\%)$]. Puede verse que los contenidos de agua alcanzados en el HMO son generalmente mayores a los obtenidos en el HC, a excepción en los PHI de 5 y 15 g de la mezcla del caolín. La diferencia relativa media, considerando las tres mezclas, tiene un valor de +0.890%.

La correlación entre ambos contenidos de agua, para los 21 pares ordenados, resulta ser similar a las presentadas en otros capítulos y tiene la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}w_{HC} &= 0.9904w_{HMO} + 0.0450 \\ r &= 0.9999\end{aligned}\tag{5.1}$$

Aunque se ha mostrado que prácticamente los contenidos de agua obtenidos con el HMO son iguales a los del HC, aún para PHI pequeños (de 5 y 15 g), lo interesante es conocer la variabilidad que en cada horno se tiene.

Tabla 5.2 Contenidos de agua obtenidos en HC y HMO para diferentes PHI en diferentes suelos

PHI (g)	Contenido de agua, w(%)					
	Caolín		Bentonita I M1		Bentonita I M2	
	HC	HMO	HC	HMO	IIC	HMO
5	38.92	39.28	38.89	40.76	202.57	204.57
15	38.86	38.92	37.77	38.73	205.66	207.27
30	38.70	38.62	38.06	38.33	205.33	206.01
50	38.83	38.72	38.52	38.74	206.32	209.21
100	38.80	38.62	38.37	38.79	206.79	208.54
150	38.93	38.64	38.50	39.33	208.13	209.29
200	39.03	38.86	38.63	39.12	205.44	209.13
val.medio	38.87	38.81	38.39	39.11	205.78	207.85

Tabla 5.3 Resumen de los contenidos de agua obtenidos en el HC y HMO

No.	Suelo	PHI (g)	T (min)	w _{HMO} (%)	w _{IIC} (%)	DIF	DIF/w _{IIC} (%)	y _{reg}
1	Caolín	5	7	39.28	38.92	0.36	0.92497	38.9483
2		15	7	38.92	38.86	0.06	0.15440	38.5918
3		30	9	38.62	38.70	-0.08	-0.20674	38.2946
4		50	10	38.72	38.83	-0.11	-0.28329	38.3937
5		100	16	38.62	38.80	-0.18	-0.46392	38.2946
6		150	19	38.64	38.93	-0.29	-0.74493	38.3144
7		200	23	38.86	39.03	-0.17	-0.43556	38.5323
8	Bentonita I M1	5	3	40.76	38.89	1.87	4.80843	40.4141
9		15	4	38.73	37.77	0.96	2.54170	38.4036
10		30	5	38.33	38.06	0.27	0.70941	38.0074
11		50	8	38.74	38.52	0.22	0.57113	38.4135
12		100	9	38.79	38.37	0.42	1.09461	38.4630
13		150	14	39.33	38.50	0.83	2.15584	38.9978
14		200	31	39.12	38.63	0.49	1.26844	38.7898
15	Bentonita I M2	5	4	204.57	202.57	2.00	0.98731	202.6532
16		15	5	207.27	205.66	1.61	0.78285	205.3273
17		30	9	206.61	205.53	0.48	0.23354	204.0794
18		50	14	209.21	206.32	2.89	1.40074	207.2487
19		100	26	208.54	206.79	1.75	0.84627	206.5851
20		150	37	209.29	208.13	1.16	0.55734	207.3279
21		200	48	209.13	205.44	3.69	1.79614	207.1694

Para esto, en las tablas 5.4 y 5.5 se incluyen los valores siguientes: el contenido de agua medio de las cuatro determinaciones de cada ensayo (w_{HC} y w_{HMO} , respectivamente), la diferencia entre el valor máximo y mínimo de los cuatro contenidos de agua (rango), el cociente rango/ w_{IIC} o rango/ w_{HMO} , la desviación estándar y el coeficiente de correlación.

Tabla 5.4 Valores de los contenidos de agua obtenidos en el HC

Sbtlo	PHI (g)	W _a (g)	Contenido de agua, w(%)			σ_a^2	σ_a	ρ_a (%)
			val.med.	rango	rango/ val.med.			
1 Caolín	5	1.40	38.92	1.33	3.41771	0.30537	0.55260	1.42002
2 Bentonita I M1	5	1.40	38.89	3.59	9.23057	2.31229	1.52062	3.90981
3 Bentonita I M2	5	3.35	202.57	1.22	0.60225	0.34109	0.58403	0.28831
4 Caolín	15	4.20	38.86	0.33	0.84931	0.02217	0.14888	0.38218
5 Bentonita I M1	15	4.11	37.77	0.38	1.00609	0.02523	0.15995	0.42085
6 Bentonita I M2	15	10.09	205.66	2.49	1.21075	1.12843	1.06227	0.51653
7 Caolín	30	8.37	38.70	0.13	0.33594	0.00282	0.05315	0.13735
8 Bentonita I M1	30	8.27	38.06	0.42	1.10352	0.03800	0.19494	0.51218
9 Bentonita I M2	30	20.18	205.53	1.35	0.65685	0.45562	0.67500	0.32842
10 Caolín	50	13.98	38.83	0.16	0.41208	0.00549	0.07411	0.19086
11 Bentonita I M1	50	13.90	38.52	0.76	1.97287	0.11649	0.34131	0.86640
12 Bentonita I M2	50	33.68	206.32	0.57	0.27627	0.08122	0.28500	0.13813
13 Caolín	100	27.96	38.80	0.07	0.18040	0.00143	0.03775	0.09229
14 Bentonita I M1	100	27.73	38.37	0.18	0.46918	0.00623	0.07895	0.20579
15 Bentonita I M2	100	67.41	206.79	0.75	0.36267	0.12083	0.34760	0.16809
16 Caolín	150	42.03	38.93	0.28	0.71929	0.01449	0.12038	0.30924
17 Bentonita I M1	150	41.70	38.50	0.05	1.12984	0.00049	0.02217	0.05758
18 Bentonita I M2	150	101.32	208.14	0.25	0.12011	0.02083	0.14434	0.06935
19 Caolín	200	56.14	39.03	0.10	0.25623	0.00216	0.04646	0.11934
20 Bentonita I M1	200	55.73	38.63	0.39	1.00964	0.02962	0.17212	0.44559
21 Bentonita I M2	200	134.52	205.44	0.12	0.05841	0.00320	0.05657	0.02754

Tabla 5.5 Valores de los contenidos de agua obtenidos en el HMO

Sbtlo	PHI (g)	W _a (g)	Contenido de agua, w(%)			σ_a^2	σ_a	ρ_a (%)
			val.med.	rango	rango/ val.med.			
1 Caolín	5	1.41	39.28	0.88	2.24061	0.15017	0.38751	0.00987
2 Bentonita I M1	5	1.45	40.76	1.98	4.85770	0.70500	0.83964	0.02060
3 Bentonita I M2	5	3.36	204.57	2.46	1.20252	1.13673	1.06618	0.00521
4 Caolín	15	4.20	38.92	0.68	1.74717	0.09367	0.30695	0.00786
5 Bentonita I M1	15	4.19	38.73	0.52	1.34272	0.04929	0.22202	0.00573
6 Bentonita I M2	15	10.12	207.27	2.09	1.00833	0.74343	0.86222	0.00416
7 Caolín	30	8.36	38.62	0.38	0.98407	0.03103	0.17616	0.00456
8 Bentonita I M1	30	8.31	38.33	0.40	1.04357	0.03420	0.18493	0.00482
9 Bentonita I M2	30	20.23	206.91	0.94	0.45430	0.29453	0.54271	0.00262
10 Caolín	50	13.95	38.72	0.23	0.59408	0.01017	0.10083	0.00260
11 Bentonita I M1	50	13.96	38.74	0.96	2.47822	0.19529	0.44192	0.01141
12 Bentonita I M2	50	33.83	209.21	1.15	0.54968	0.22043	0.46949	0.00224
13 Caolín	100	27.86	38.62	0.23	0.59551	0.01429	0.11955	0.00310
14 Bentonita I M1	100	27.95	38.80	0.13	0.33507	0.00303	0.05500	0.00142
15 Bentonita I M2	100	67.59	208.54	0.78	0.37404	0.10390	0.32234	0.00155
16 Caolín	150	41.81	38.64	0.08	0.20703	0.00142	0.03775	0.00098
17 Bentonita I M1	150	42.34	39.33	0.25	0.63565	0.01447	0.12028	0.00306
18 Bentonita I M2	150	101.50	209.29	0.51	0.24368	0.06082	0.24663	0.00118
19 Caolín	200	55.97	38.86	0.13	0.33456	0.00316	0.05620	0.00145
20 Bentonita I M1	200	56.25	39.14	0.41	1.04766	0.03017	0.17369	0.00444
21 Bentonita I M2	200	135.30	209.13	0.50	0.23049	0.05340	0.23108	0.00110

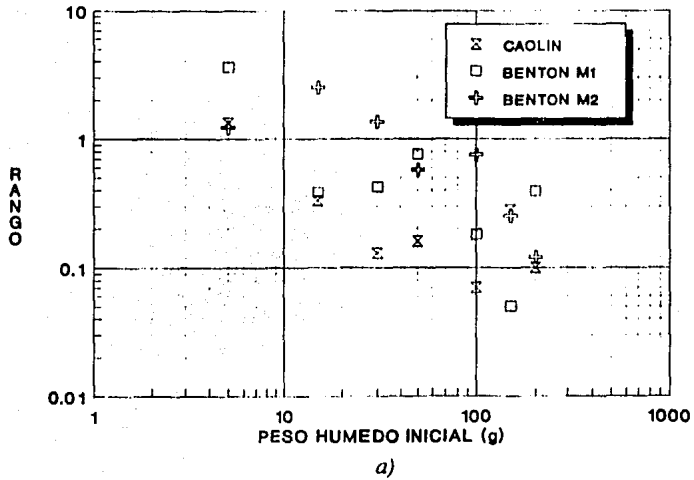
La Fig 5.10 demuestra que el rango, para ambos hornos, se incrementa cuando el PHI disminuye. Se observa también que el rango es mayor para arcillas de alta plasticidad y gran contenido de agua que para arcillas de baja plasticidad, independientemente del PHI.

Analizando los resultados de acuerdo a los conceptos estadísticos. Cuanto menos dispersos están los elementos de un grupo de valores, alrededor de su media, la variancia (σ_x^2) es pequeña [ec (4.20)]. Por otra parte, el coeficiente de variación [$\nu_x(\%)$, ec (4.18)] es útil cuando se comparan las desviaciones relativas de varios grupos de datos.

En la Fig 5.11 se muestra la relación entre el PHI y la variancia, para los resultados de ambos hornos. Puede observarse que los resultados correspondientes a la Bentonita I M2 forman una *curva superior* indicando así que las variaciones valores son mayores cuando el suelo tiene un alto w(%) y su plasticidad es alta (recuérdese que el rango es también mayor). La *curva inferior* se define por los resultados de la arcilla de baja plasticidad (Caolín). Las curvas tienden a ser paralelas cuando el PHI es mayor a 50 g.

A pesar de tener mayor cantidad de PHI, existen siempre diferencias en los w(%) de una misma mezcla homogénea; en otras palabras: no se tiene un mismo valor de w(%) de muestras provenientes de una misma mezcla. La comparación de σ_x^2 y $\nu_x(\%)$ de ambos hornos se presenta en las Figs 5.12 y 5.13. Se comprueba que en ambas técnicas se tienen imprecisiones experimentales intrínsecas. Sin embargo, es claro que a menor PHI, mayor variancia (Fig 5.11).

HORNO DE CONVECCION



HORNO DE MICROONDAS

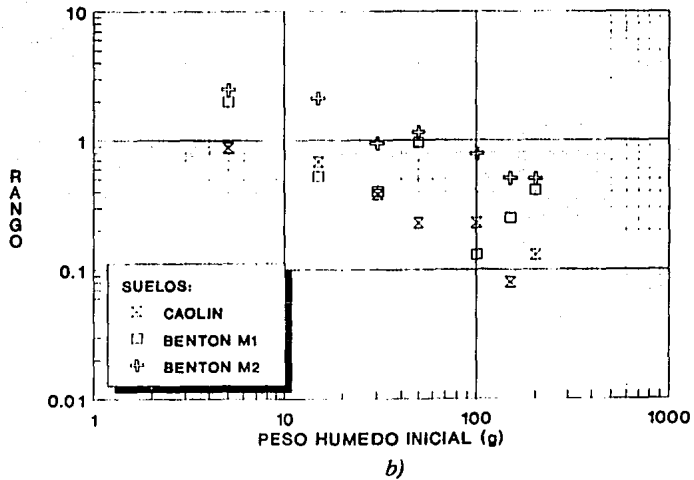
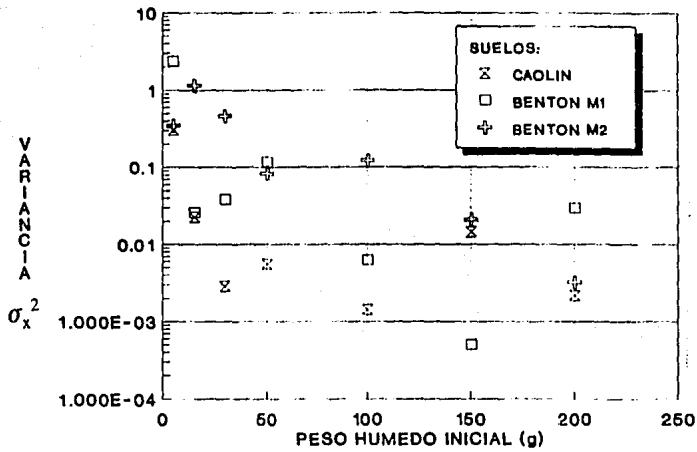


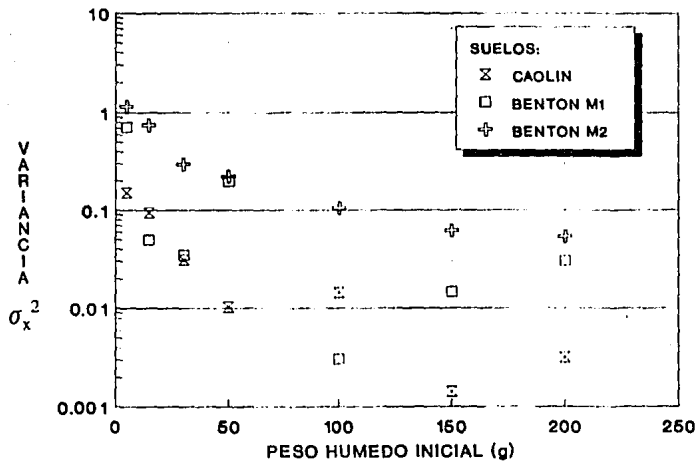
Fig 5.10 Peso humedo inicial vs rango, a) *Horno de convección* y b) *Horno de microondas*

HORNO DE CONVECCION



a)

HORNO DE MICROONDAS



b)

Fig 5.11 Peso humedo inial vs variancia a) *Horno de Convección* y b) *Horno de Microondas*

VARIANCIAS CONTENIDOS DE AGUA

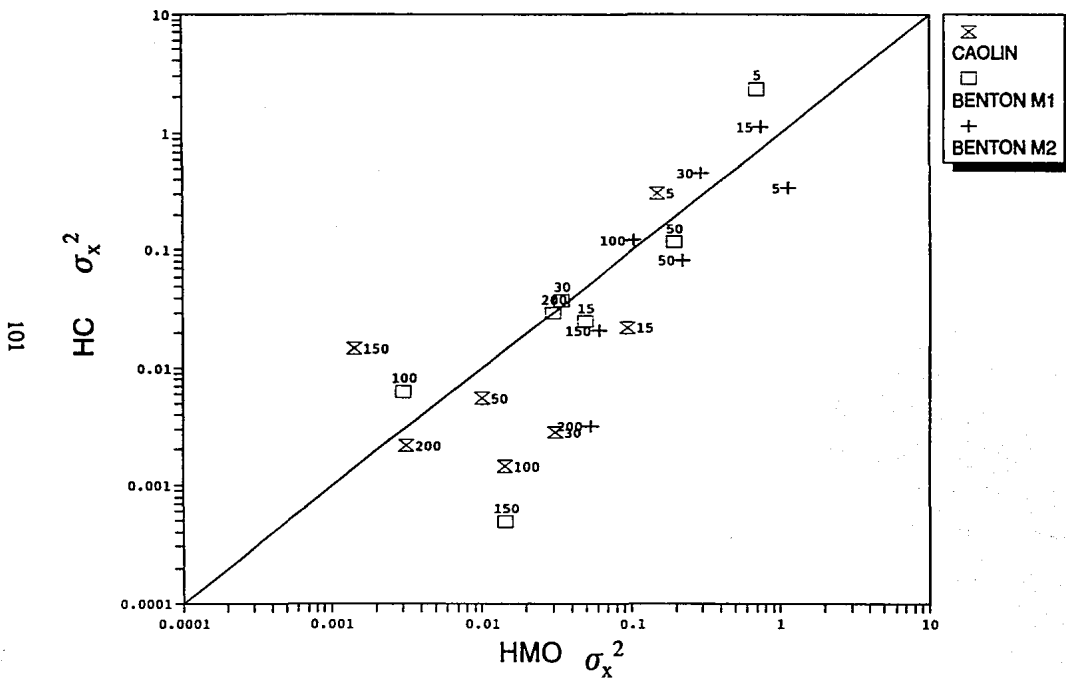


Fig 5.12 Comparación entre el HMO y HC de σ_x^2 del contenido de agua

COEFICIENTE DE VARIACION CONTENIDOS DE AGUA

102

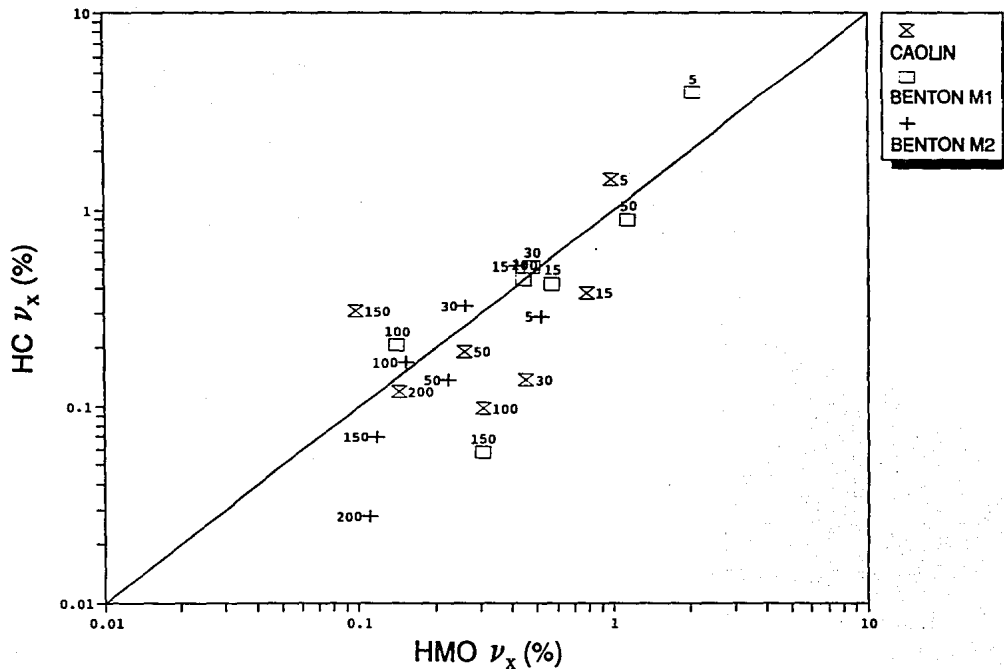


Fig 5.13 Comparación entre el HMO y HC de ν_x del contenido de agua

El uso del HMO no se limita a sólo secar muestras con PHI cercanos a 100 g, la ecuación (4.5) demuestra que con 30 g de suelo se tiene una fuerte correlación con el HC. En cuanto a la utilización de PHI pequeños, la Fig 5.11 muestra que se tiene mayor variancia cuanto menor en peso son éstos. Cuando se requiere obtener el w_L , la cantidad de PHI que se necesita para determinar un contenido de agua de la curva de fluidez generalmente es menor a 8 g; esta cantidad no limita el uso del HMO como puede verse en los resultados de la ecuación (6.20) que relaciona 138 valores. A pesar que la variabilidad es mayor para PHI menores a 10 g, da lo mismo usar el HC o el HMO para tal fin.

5.3 Secado de muestras de Caolín y Bentonita I con potencia 8 del HMO

Para el caolín se secaron 20 muestras con diferente PHI y contenido de agua; en el caso de la bentonita I el número de muestras fue de 16. Se tienen contenidos de agua cercanos al límite plástico (caolín) o por debajo de él (bentonita I) y mayores al límite líquido. La Tabla 5.6 contiene los resultados junto con los parámetros de la recta de regresión, que resulta ser similar a las presentadas en los capítulos anteriores [ecuación (4.5), (4.18), (5.1), (6.17) y (6.20)].

$$w_{HC} = 0.99212w_{HMO} + 0.11369 \tag{5.2}$$

$$r = 0.99998$$

En la Fig 5.14 se incluyen los resultados junto con la recta de correlación.

La utilización de alguna potencia menor para el secado de suelo, influye solamente en el tiempo total de secado: a menor potencia, mayor es el tiempo requerido para obtener el peso seco de la muestra (Fig 5.8). Al iniciar el calentamiento se tendrá poca pérdida de agua, por lo tanto se podrá dejar a la muestra más tiempo (alrededor de 7 minutos) en esta primera etapa y posteriormente monitorear a intervalos de tiempo menores hasta obtener peso seco constante.

En suelos con gran cantidad de ferromagnesianos, se recomienda utilizar una potencia de secado menor a la total, por ejemplo la potencia 5, para evitar un sobrecalentamiento excesivo en la muestra de suelo y la posibilidad de que *explote*.

Tabla 5.6 Contenidos de agua secados en HC y HMO (potencia 8), suelos Caolín y Bentonita I

Suelo	PHI (g)		w(%)	w(%)	DIF	DIF/w _{HC}	Yreg	
	HMO	HC	HMO	HC				
1	Caolín (CL)	23.55	20.67	25.91	26.04	-0.13	-0.49923	25.7569
2		26.58	24.64	28.90	29.04	-0.14	-0.48209	28.7233
3		29.85	26.29	29.34	29.30	0.04	0.13652	29.1599
4		32.15	29.35	30.91	31.14	-0.23	-0.73860	30.7175
5		28.45	24.12	32.07	32.09	-0.02	-0.06232	31.8684
6		27.90	23.98	34.19	34.32	-0.13	-0.37879	33.9717
7		23.89	23.99	34.51	34.60	-0.09	-0.26012	34.2892
8		23.05	21.22	35.38	35.53	-0.15	-0.42218	35.1523
9		43.84	41.47	36.62	36.84	-0.22	-0.59718	36.3825
10		19.37	20.59	39.90	40.17	-0.27	-0.67214	39.6367
11	21.12	20.46	41.80	42.01	-0.21	-0.49988	41.5217	
12	30.81	30.77	43.39	43.31	0.08	0.18471	43.0992	
13	25.87	21.43	44.22	44.05	0.17	0.38593	43.9227	
14	35.89	40.63	45.18	45.21	-0.03	-0.06636	44.8751	
15	24.70	20.65	50.90	51.37	-0.47	-0.91493	50.5500	
16	21.38	22.10	53.55	53.70	-0.15	-0.27933	53.1792	
17	22.84	27.36	57.73	57.65	0.08	0.13877	57.3262	
18	27.32	29.88	59.19	59.17	0.02	0.03380	58.7747	
19	43.12	37.98	59.24	59.10	0.14	0.23689	58.8243	
20	29.18	25.33	64.10	64.22	-0.12	-0.18686	63.6461	
21	Bentonita I (CH)	25.08	25.43	24.90	24.21	0.69	2.85006	24.7549
22		26.63	24.88	29.78	29.12	0.66	2.26648	29.5964
23		28.48	27.42	35.03	34.48	0.55	1.59513	34.8051
24		27.41	26.88	40.54	39.66	0.88	2.21886	40.2717
25		26.93	25.83	46.34	45.40	0.94	2.07048	46.0260
26		29.49	27.90	52.38	51.47	0.91	1.76802	52.0184
27		24.79	26.37	71.09	69.99	1.10	1.57165	70.5810
28		24.50	25.60	80.73	79.66	1.07	1.34321	80.1451
29		25.37	25.83	112.69	111.47	1.22	1.09446	111.8533
30		24.34	24.02	135.45	133.63	1.82	1.36197	134.4340
31		29.96	27.42	162.85	161.19	1.66	0.40693	161.6182
32		24.64	23.08	206.06	203.36	2.70	1.32769	204.4878
33		24.55	25.81	233.66	232.13	1.53	0.65911	231.8704
34		30.06	27.02	237.23	235.48	1.75	0.74316	235.4122
35		28.81	28.10	296.19	294.60	1.59	0.53971	293.9078
36		22.92	23.74	324.69	322.89	1.80	0.24700	322.1833
Salida de regresión:								
Constante		0.11369						
Err Estándar Est Y		0.50705						
R Cuadrado		0.99996						
No. de Observaciones		36						
Grados de Libertad		34						
R		0.99998						
Coeficiente de X		0.992123						
Err Estándar de Coef.		0.001072						

CONTENIDO DE AGUA, w(%)
POTENCIA 8-HMO vs HC

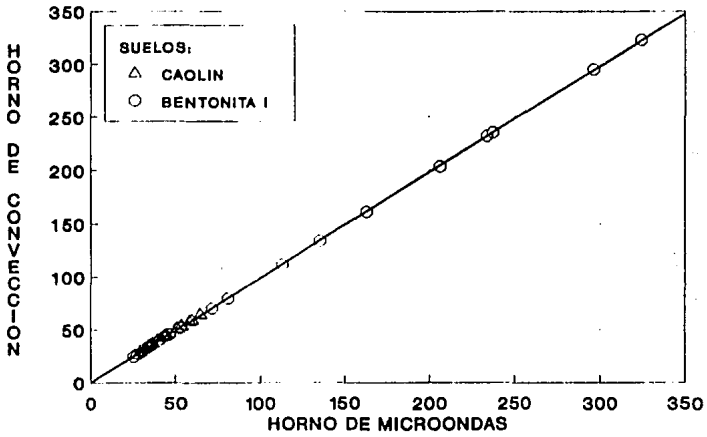


Fig 5.14 Contenido de agua, HMO vs HC para la potencia 8 del HMO

6. EVALUACION EXPERIMENTAL DE LAS TECNICAS PARA DETERMINAR EL LIMITE LIQUIDO

En este capítulo se expone un programa que tuvo por objetivo la evaluación experimental de técnicas tales como la *copa de Casagrande*, *cono sueco* y *cono inglés*, para determinar el límite líquido de los suelos. Para el secado de las muestras de suelo se utilizó en forma simultánea el HC y el HMO, lo que permite hacer comparaciones de los w_L entre las técnicas alternativas y los diferentes hornos.

6.1 Suelos ensayados

En la Tabla 6.1 se han recogido las características de los suelos estudiados en este programa experimental.

6.2 Equipo utilizado

En las figuras 6.1, 6.2 y 6.3 se presentan la copa de Casagrande, el cono sueco y el cono inglés, respectivamente.

6.3 Procedimiento de ensaye

La determinación del w_L con el cono sueco e inglés se lleva a cabo de manera similar a como se

Tabla 6.1 Propiedades de los suelos ensayados con la copa de Casagrande, cono sueco y cono inglés

Suelo	W_{nat} (%)	W_L (%)	W_P (%)	PI (%)
San Vicente (SM)	6.38	30.61	22.79	7.80
Chicoasén (SC)	2.65	31.60	18.95	12.65
Caolín (CL)	0.90	47.30	20.40	26.90
La Peña (CH)	11.04	70.23	30.02	40.21
Bentonita II (CH)	13.46	270.40	44.65	225.50
Ebano SLP (CH)	57.12	75.61	28.49	47.12
Tlahuac bombas (CH)	190.00	249.00	80.87	168.13
Necaxa (MH)	10.86	76.43	56.40	20.03
San Antonio Abad (MH)	361.29	376.20	127.80	248.40

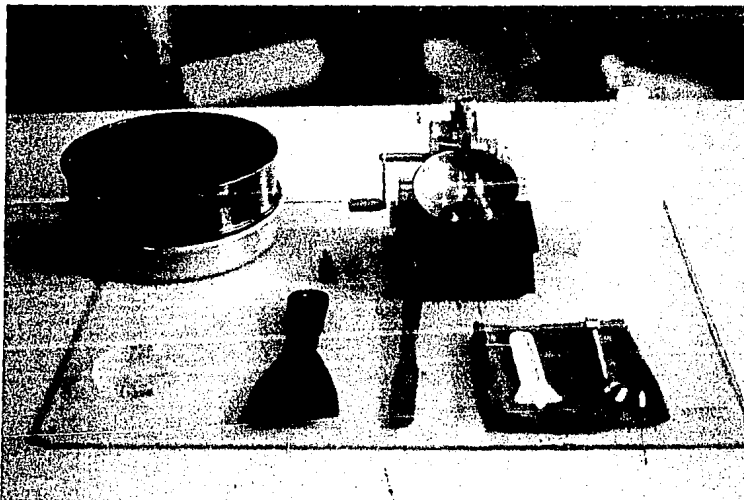


Fig 6.1 Equipo utilizado con la copa de Casagrande

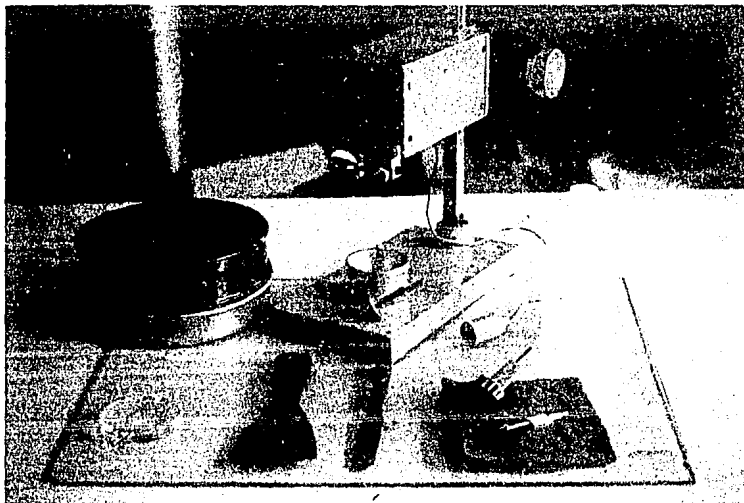


Fig 6.2 Equipo utilizado con el cono sueco

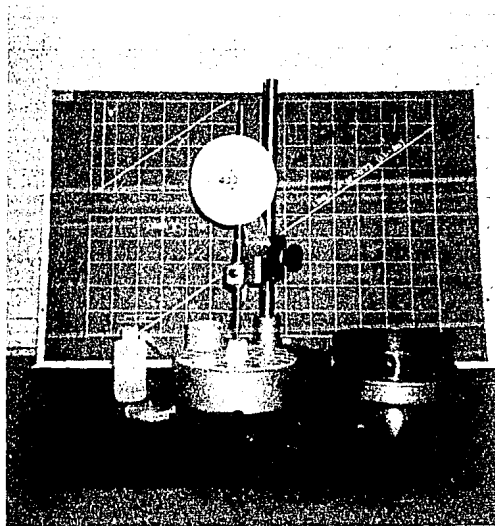


Fig 6.3 Equipo utilizado con el cono inglés

procede con la copa de Casagrande. En efecto, se hace variar por incrementos el contenido de agua, y se mide en cada etapa la profundidad de penetración, d , del cono. En todos los ensayos presentados en este capítulo siempre se fue agregando agua.

El uso de cada técnica estuvo de acuerdo con lo establecido por su norma: copa de Casagrande (*ASTM D4318-88*), cono sueco (*Karlsson, 1981*) y para el cono inglés (*Sherwood & Ryley, 1970*).

Previamente al ensayo, el material se remoldeaba lo suficiente para lograr homogeneidad, con un contenido de agua que permitiera una penetración de 10 mm en el cono inglés, y su tiempo de curado nunca fue menor de 24 horas.

Cada punto de las curvas de fluidez, para las tres técnicas, correspondió al promedio de 2 determinaciones y por lo menos 4 puntos se determinaron para formar cada curva. Del material contenido en la copa, para un cierto número de golpes, se tomaban 4 porciones para ser secadas: 2 en el HC y 2 en el HMO; de forma similar para ambos conos. Haciendo lo anterior se tenían 2 curvas de fluidez para cada técnica, obteniéndose así un límite líquido en el HC (w_{LHC}) y otro en el HMO (w_{LHMO}). El peso de suelo húmedo para obtener su contenido de agua nunca fue menor a 5 g y se colocaba en vidrios de reloj de 10 cm de diámetro. Las 6 muestras se secaban en forma simultánea en cada horno. Para un cierto contenido de agua se obtenía el número de golpes en la copa y la penetración en cada cono. Todos los ensayos pertenecían a una sola mezcla.

6.4 Análisis de resultados

6.4.1 Correlación entre las técnicas

6.4.1.1 Cono sueco vs copa de Casagrande

a) Secado en el Horno de Convección

En la Tabla 6.2 se dan los resultados de los ensayos realizados con ambas técnicas, los del cono sueco como valores de x y como valores de y los correspondientes a la copa, $(x,y) = (w_{Lcono}, w_{Lcopa})$. La diferencia de ambos límites, $DIF = w_{Lcono} - w_{Lcopa}$, y la diferencia relativa definida como DIF/w_{Lcopa} se muestran en la misma tabla.

Se calcularon dos rectas de regresión, una para el total de los datos ($N=9$) que cubre el intervalo de 30% a 350% de límites líquidos en la copa, y la segunda para valores menores a 100% ($N=6$), y son:

$$w_{Lcopa} = 1.26150w_{Lcono\ sueco} - 12.14167$$

$$[30\% < w_{Lcopa} < 350\%] \quad (6.1)$$

$$r = 0.98747$$

Tabla 6.2 Límites líquidos determinados con el cono sueco y la copa de Casagrande, secados en HC

	Suelo	Copa de Casagrande HC	Cono sueco HC	DIF	DIF/ w_{LCC} (%)	y_{reg}
1	SAN VICENTE (SM)	30.61	33.31	2.70	8.82065	29.8791
2	CHICOASEN (SC)	31.60	32.78	1.18	3.73418	29.2105
3	CAOLIN (CL)	48.37	51.06	2.69	5.56130	52.2708
4	LA PEÑA (CH)	70.23	65.50	-4.73	-6.73501	70.4869
5	EBANO SLP (CH)	75.61	73.31	-2.30	-3.04193	80.3392
6	NECAXA (MH)	78.60	85.33	6.73	8.56234	95.5025
7	TLAHUAC (CH)	223.61	184.60	-39.01	-17.44555	220.7321
8	BENTONITA II (CH)	280.74	197.46	-83.28	-29.66446	236.9550
9	SAN ANTONIO ABAD	346.34	303.19	-43.15	-12.45886	370.3339
Salida de Regresión::						
	Constante		-12.1416			
	Err Estándar Est Y		20.10934	-83.28	-29.664%	val. mín
	R Cuadrado		0.975094	6.73	8.8206%	val. máx
	No. de Observaciones		9	-17.68	-4.7408%	val. med
	Grados de Libertad		7			
	R		0.987468			
	Coefficiente de X	1.261504				
	Err Estándar de Coef.	0.076201				

$$w_{Lcopa} = 0.99778w_{Lcono\ sueco} - 0.91860$$

$$[30\% < w_{Lcopa} < 100\%] \quad (6.2)$$

$$r = 0.98267$$

Puede notarse que r es alto y demuestra gran dependencia lineal entre las determinaciones experimentales, e intrínsecamente en las técnicas mismas.

Mendoza (1991b) presenta una recta de regresión para suelos similares de este estudio con un rango de w_{Lcopa} de 30% a 390% (N=19) y una segunda para valores menores a 100% (N=11); éstas son:

$$w_{Lcopa} = 1.2856w_{Lcono\ sueco} - 12.04$$

$$[30\% < w_{Lcopa} < 390\%] \quad (3.10)$$

$$r = 0.9979$$

$$w_{Lcopa} = 1.1949w_{Lcono\ suevo} - 9.27$$

$$[30\% < w_{Lcopa} < 100\%]$$

$$r = 0.9948$$
(3.11)

Nótese que la ecuación (6.1) es prácticamente igual a la (3.10), aunque el coeficiente de correlación de esta última es mayor, se puede concluir entonces que la relación se mantiene aun para diferentes operadores; ésto no sucede para las ecuaciones (6.2) y (3.11), lo que puede explicarse por la falta de un mayor número de datos experimentales en este estudio.

De la Tabla 6.2, la diferencia relativa media es de -4.74% e indica que $w_{Lcono} < w_{Lcopa}$, además de mostrar discrepancias (*Mendoza op cit* presenta una de -10.136%). Para valores de $w_{Lcono} < 46\%$ resulta $w_{Lcono} > w_{Lcopa}$. Aunque los valores de límites líquidos se correlacionan linealmente, numéricamente son diferentes, Fig 6.4.

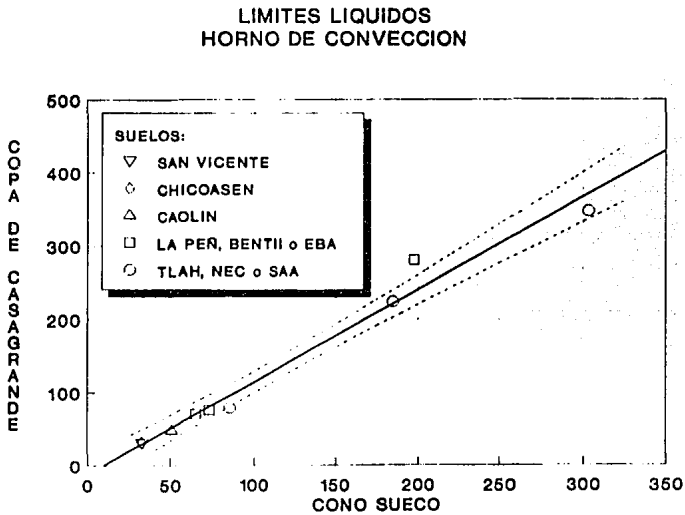


Fig 6.4 Correlación de los límites líquidos de diversos suelos obtenidos con el cono sueco y copa de Casagrande, secados en HC

Cuando sólo se tienen límites menores a 100%, los valores estimados con el cono sueco son mayores a los de copa, como se desprende de la ecuación (6.2) y Fig 6.5.

LIMITES LIQUIDOS HORNO DE CONVECCION

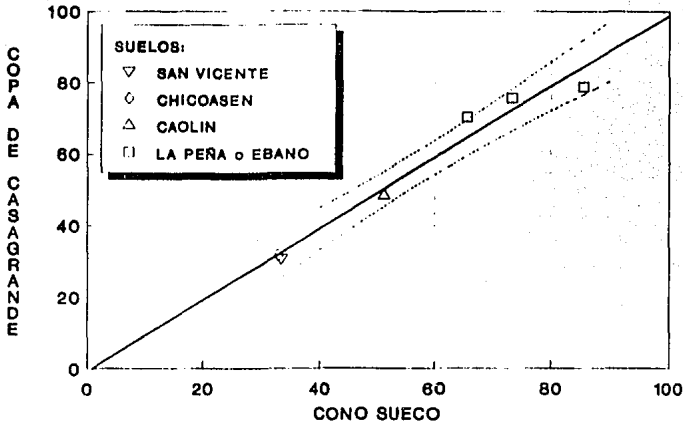


Fig 6.5 Límites líquidos menores a 100% de diferentes suelos determinados con el cono sueco y la copa de Casagrande, secados con el HC

En las figuras 6.4 y 6.5 se incluyen las curvas que forman la frontera del intervalo de confianza para mostrar la bondad de los puntos de la recta de regresión. Dichas curvas fueron calculadas considerando un nivel de confianza de $(1-\alpha) = 0.98$, para demostrar que el valor de y tiene en efecto probabilidad del 98%, al caer entre ellas.

Aunque las ecuaciones (6.1) y (6.2) arrojan resultados diferentes a los que de las expresiones (3.10) y (3.11), la tendencia de los coeficientes y constantes se conserva. *Karlsson (1981)* presenta las siguientes ecuaciones de regresión calculadas para diferentes suelos suecos, con rangos de 50% a 175% y 18% a 110%:

$$w_{Lcopa} = 1.13w_{Lcono\ sueco} - 5 \quad (3.1)$$

$$[18\% < w_{Lcopa} < 110\%]$$

$$w_{Lcopa} = 1.28w_{Lcono\ sueco} - 13 \quad (3.2)$$

$$[50\% < w_{Lcopa} < 175\%]$$

b) Secado en el Horno de Microondas

Los resultados de los límites líquidos obtenidos al secar con el HMO se presentan en la Tabla 6.3. Como puede verse, los valores con esta técnica son prácticamente iguales a los obtenidos con el HMO, Tabla 6.2.

Tabla 6.3 Límites líquidos determinados con el cono sueco y la copa de Casagrande, secados en HMO

Suelo		Copa de Casagrande HMO	Cono sueco HMO	DIF	DIF/ w_{LRC} (%)	Y_{reg}
1	SAN VICENTE (SM)	30.19	32.85	2.66	8.81086	29.5028
2	CHICOASEN (SC)	31.81	32.83	1.02	3.20654	29.4775
3	CAOLIN (CL)	48.36	51.10	2.74	5.66584	52.5310
4	LA PEÑA (CH)	70.56	64.75	-5.81	-8.23413	69.7549
5	EBANO SLP (CH)	75.79	73.72	-2.07	-2.73123	81.0734
6	NECAXA (MH)	79.36	85.33	5.97	7.52268	95.7231
7	TLAHUAC (CH)	223.60	185.87	-37.73	-16.87388	222.5866
8	BENTONITA II (CH)	286.48	200.40	-86.08	-30.04747	240.9209
9	SAN ANTONIO ABAD	346.99	303.94	-43.05	-12.40670	371.5698
Salida de Regresión::						
Constante		-11.9480				
Err Estándar Est Y		20.70352	-86.08	-30.047%	val.min	
R Cuadrado		0.974039	5.97	8.8108%	val.máx	
No. de Observaciones		9				
Grados de Libertad		7				
R		0.986934				
Coeficiente de X		1.261821				
Err Estándar de Coef.		0.077860				

Las rectas de regresión definidas para los rangos comentados anteriormente son:

$$w_{Lcopa} = 1.26182w_{Lcono\ sueco} - 11.94805$$

$$[30\% < w_{Lcopa} < 350\%] \quad (6.3)$$

$$r = 0.98693$$

$$w_{Lcopa} = 1.00618w_{Lcono\ sueco} - 1.10276$$

$$[30\% < w_{Lcopa} < 100\%] \quad (6.4)$$

$$r = 0.98239$$

Tanto la pendiente y la constante de las ecuaciones anteriores son prácticamente iguales a las de (6.1) y (6.2), lo que corrobora el uso factible y confiable del HMO para pruebas de rutina. La Fig 6.6 recoge el total de los datos observados, junto con la recta de regresión (6.3) y las curvas del intervalo de confianza para $\alpha=0.02$; de igual manera para los datos menores a 100% se presenta la Fig 6.7. Del trabajo de *Mendoza op cit* las rectas de regresión obtenidas son:

$$w_{Lcopa} = 1.325w_{Lcono\ succo} - 12.84$$

$$[30\% < w_{Lcopa} < 390\%]$$

$$r = 0.9923$$
(3.12)

$$w_{Lcopa} = 1.1943w_{Lcono\ succo} - 8.916$$

$$[30\% < w_{Lcopa} < 100\%]$$

$$r = 0.9968$$
(3.13)

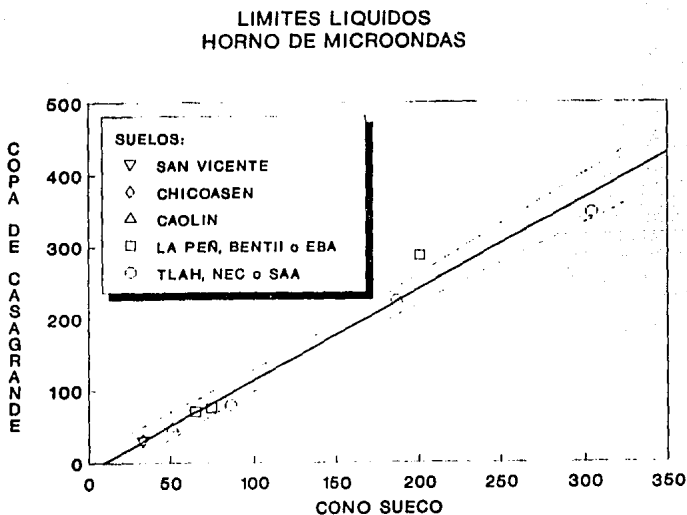


Fig 6.6 Correlaciones entre los límites líquidos de diferentes suelos, obtenidos con el cono sueco y la copa de Casagrande, secados en HMO

LIMITES LIQUIDOS
HORNO DE MICROONDAS

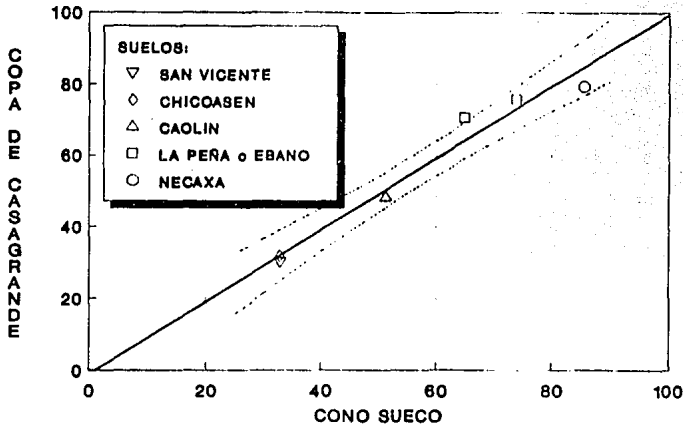


Fig 6.7 Correlaciones entre los límites líquidos menores a 100% de diferentes suelos, determinados con el cono sueco y la copa de Casagrande, secados en HMO

Con los resultados expuestos y el de otras investigaciones (capítulo 3), parecen indicar que la penetración del cono sueco con carga libre que parte del contacto de su ápice con la superficie enrazada del suelo, permite determinar el límite líquido de una forma fácil con resultados igualmente confiables a los obtenidos con la copa de Casagrande, además de validar en forma general las correlaciones aquí expuestas.

6.4.1.2 Cono inglés vs copa de Casagrande

a) Secado en el Horno de Convección

Los resultados de los ensayos, Tabla 6.4, del cono inglés con la copa de Casagrande son correlacionados linealmente pero no numéricamente iguales, tal como sucede entre el cono sueco y la copa. Las ecuaciones obtenidas son las siguientes siguientes:

$$w_{Lcopa} = 1.1762w_{Lcono\ inglés} - 12.8277$$

$$[30\% < w_{Lcopa} < 350\%] \tag{6.5}$$

$$r = 0.98937$$

Tabla 6.4 Límites líquidos determinados con el cono inglés y la copa de Casagrande, secados en HC

Suelo		Copa de Casagrande HC	Cono inglés HC	DIF	DIF/ w_{LCC} (%)	y_{reg}
1	SAN VICENTE (SM)	30.61	33.61	3.00	9.80072	26.7030
2	CHICOASEN (SC)	31.60	35.49	3.89	12.31013	28.9141
3	CAOLIN (CL)	48.37	57.33	8.96	18.52388	54.6014
4	LA PEÑA (CH)	70.23	68.81	-1.42	-2.02193	68.1037
5	EBANO SLP (CH)	75.61	78.79	3.18	4.20579	79.8417
6	NECAXA (MH)	78.60	94.04	15.44	19.64377	97.7781
7	TLAHUAC (CH)	223.61	197.11	-26.5	-11.85099	219.0047
8	BENTONITA II (CH)	280.74	217.17	-63.57	-22.64373	242.5984
9	SAN ANTONIO ABAD	346.34	323.93	-22.41	-6.47052	368.1649
Salida de Regresión::						
Constante			-12.8277			
Err Estándar Est Y			18.53128	-63.57	-22.643%	val.mín
R Cuadrado			0.978850	15.44	19.64377	val.máx
No. de Observaciones			9	-8.8255	2.38857	val.med
Grados de Libertad			7			
R			0.989368			
Coeficiente de X		1.176157				
Err Estándar de Coef.		0.065345				

$$w_{Lcopa} = 0.8856w_{Lcono\ inglés} + 1.5124 \quad (6.6)$$

$$[30\% < w_{Lcopa} < 100\%]$$

$$r = 0.97139$$

La ecuación (6.5) tiene un r menor a la (6.1) y una pendiente menor. En el caso de la (6.6) de igual manera r es menor en comparación a la (6.2) y es similar a las presentadas en la Tabla 3.4 en donde la mayoría cubren el intervalo de w_{Lcopa} similar en este estudio. A pesar que la diferencia relativa media para todos los datos de la Tabla 6.4 (2.38%) indica que $w_{Lcono} > w_{Lcopa}$, sólo sucede para $w_{Lcono} < 73\%$. Las figuras 6.8 y 6.9 contienen los resultados de los ensayos, para los rangos definidos, las ecuaciones de regresión y las curvas del intervalo de confianza con $\alpha=0.02$.

LIMITES LIQUIDOS
HORNO DE CONVECCION

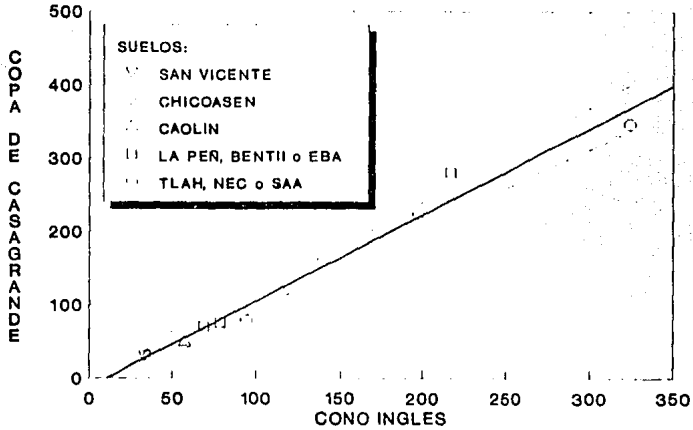


Fig 6.8 Límites líquidos de diferentes suelos determinados con el cono inglés y la copa de Casagrande, secados en HC

LIMITES LIQUIDOS
HORNO DE CONVECCION

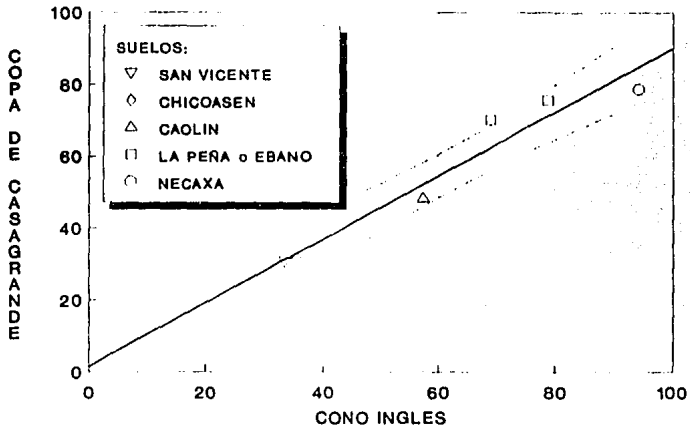


Fig 6.9 Límites líquidos menores a 100% de diferentes suelos determinados con el cono inglés y la copa de Casagrande, secados en HC

b) Secado en el Horno de Microondas

El secado de suelos mediante el HMO con el fin de obtener el w_L , proporciona resultados prácticamente iguales si se usa el HC. En el caso de la relación de los resultados cono inglés-copa de Casagrande, Tabla 6.5, las ecuaciones que se obtienen para los rangos establecidos son las siguientes:

$$w_{Lcopa} = 1.18505w_{Lcono\ inglés} - 13.4374$$

$$[30\% < w_{Lcopa} < 350\%] \quad (6.7)$$

$$r = 0.98930$$

$$w_{Lcopa} = 0.8891w_{Lcono\ inglés} + 1.3726$$

$$[30\% < w_{Lcopa} < 100\%] \quad (6.8)$$

$$r = 0.96776$$

Tabla 6.5 Límites líquidos determinados con el cono inglés y la copa de Casagrande, secados en HMO

	Suelo	Copa de Casagrande HMO	Cono inglés HMO	DIF	DIF/ w_{Lcr} (%)	y_{reg}
1	SAN VICENTE (SM)	30.19	33.67	3.48	11.52700	26.46
2	CHICOASEN (SC)	31.81	35.82	4.01	12.60610	29.01
3	CAOLIN (CL)	48.36	57.45	9.09	18.79653	54.64
4	LA PEÑA (CH)	70.56	67.80	-2.76	-3.91156	66.91
5	EBANO SLP (CH)	75.79	79.14	3.35	4.42011	80.35
6	NECAXA (MH)	79.36	94.85	15.49	19.51865	98.96
7	TLAHUAC (CH)	223.60	196.56	-27.04	-12.09302	219.50
8	BENTONITA II (CH)	286.48	220.72	-65.76	-22.95448	248.13
9	SAN ANTONIO ABAD	346.99	322.87	-24.12	-6.95121	369.18
Salida de Regresión:						
Constante						
	Err Estándar Est Y		-13.43743	-65.76	-22.954%	val. mín
	R Cuadrado		0.978716	15.49	19.5186%	val. máx
	No. de Observaciones		9	-9.362	2.3286%	val. med
	Grados de Libertad		7			
	R		0.989301			
	Coefficiente de X	1.185048				
	Err Estándar de Coef.	0.066050				

Aun cuando son muy similares a las ecuaciones (6.5) y (6.6), el r obtenido es mayor y la diferencia relativa es de 2.328%. Los resultados se recogen en las figuras 6.10 y 6.11, junto con las rectas de regresión correspondientes y los intervalos de confianza para $\alpha=0.02$.

Debe quedar claro que la correlación entre los resultados obtenidos en ambos conos y la copa de Casagrande se correlacionan linealmente, pero no son numéricamente iguales.

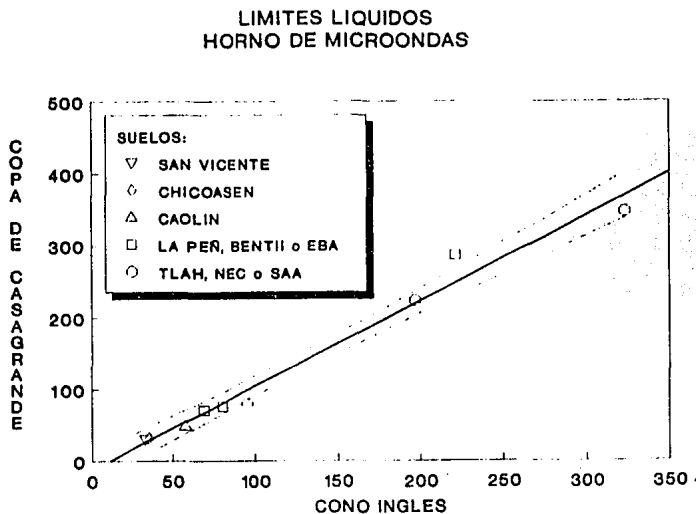


Fig 6.10 Correlación de los límites líquidos obtenidos con el cono inglés y la copa de Casagrande, secados en HMO

**LIMITES LIQUIDOS
HORNO DE MICROONDAS**

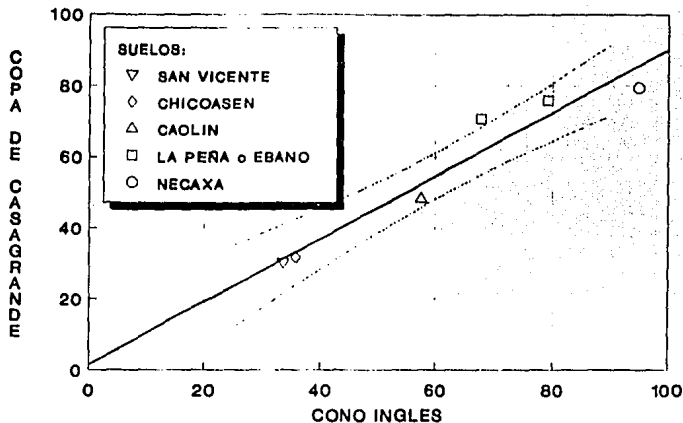


Fig 6.11 Correlaciones de los límites líquidos menores a 100% obtenidos con el cono inglés y la copa de Casagrande, secados en HMO

6.4.1.3 Cono sueco vs cono inglés

a) Secado en el Horno de Convección

En 6.4.1.1 y 6.4.1.2 se mostraron las correlaciones lineales entre los resultados de estos conos con los de la copa de Casagrande, en las que el r obtenido fue mayor a 0.98.

Los resultados de este estudio experimental para ambos conos, Tabla 6.6, y la correlación del conjunto de pares ordenados $(x, y) = (w_{L\text{cono sueco}}, w_{L\text{cono inglés}})$ arrojan resultados de gran interés. Para el total de los resultados contenidos en la Tabla 6.6 y menores a 100%, las ecuaciones respectivas son:

$$w_{L\text{cono inglés}} = 1.07431 w_{L\text{cono sueco}} + 0.38425$$

$$[30 < w_{L\text{cono sueco}} < 305] \quad (6.9)$$

$$r = 0.99970$$

$$w_{L\text{cono inglés}} = 1.11078 w_{L\text{cono sueco}} - 1.83828$$

$$[30\% < w_{L\text{cono sueco}} < 100\%] \quad (6.10)$$

$$r = 0.99729$$

Tabla 6.6 Límites líquidos determinados con el cono sueco y cono inglés, obtenidos con HC

	Suelo	Cono inglés HC	Cono sueco HC	DIF	DIF/ $w_{L\text{Sueco}}$ (%)	y_{reg}
1	SAN VICENTE (SM)	33.61	33.31	-0.30	-0.90063	36.1695
2	CHICOASEN (SC)	35.49	32.78	-2.71	-8.26724	35.6001
3	CAOLIN (CL)	57.33	51.06	-6.27	-12.27967	55.2385
4	LA PEÑA (CH)	68.81	65.50	-3.31	-5.05344	70.7515
5	EBANO SLP (CH)	78.79	73.31	-5.48	-7.47511	79.1419
6	NECAXA (MIH)	94.04	85.33	-8.71	-10.20743	92.0551
7	TLAHUAC (CH)	197.11	184.60	-12.51	-6.77681	198.7018
8	BENTONITA II (CH)	217.17	197.46	-19.71	-9.98177	212.5174
9	SAN ANTONIO ABAD	323.93	303.19	-20.74	-6.84060	326.1042
Salida de Regresión::						
	Constante		0.384253			
	Err Estándar Est Y		2.609820	-20.74	-12.2796%	val.mín
	R Cuadrado		0.999407	-0.30	-0.9006%	val.máx
	No. de Observaciones		9	-8.8600	-7.5314%	val.med
	Grados de Libertad		7			
	R		0.999703			
	Coefficiente de X	1.074309				
	Err Estándar de Coef.	0.009889				

Nótese que la dispersión de los resultados, Fig 6.12 y 6.13, es menor en comparación con lo obtenido para correlaciones mixtas cono-copa; numéricamente puede verse por el valor más alto de r que en este caso es mayor a 0.99. Tal parece que la correlación entre pruebas del mismo tipo es más fuerte que en pruebas mixtas para el mismo objetivo.

Si se obliga a las ecuaciones de regresión a pasar por el origen se obtiene:

$$w_{L\text{cono inglés}} = 1.07642w_{L\text{cono sueco}}$$

$$[30\% < w_{L\text{cono sueco}} < 305\%] \quad (6.11)$$

$$r = 0.99970$$

$$w_{L\text{cono inglés}} = 1.08192w_{L\text{cono sueco}}$$

$$[30\% < w_{L\text{cono sueco}} < 100\%] \quad (6.12)$$

$$r = 0.99692$$

LIMITES LIQUIDOS
HORNO DE CONVECCION

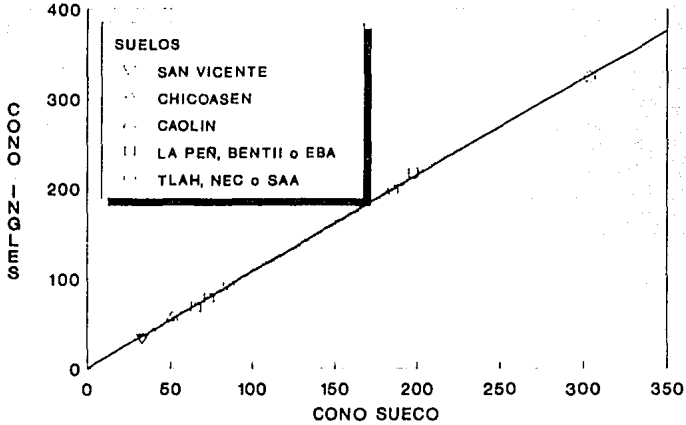


Fig 6.12 Correlacion entre los límites líquidos de diferentes suelos, determinados con el cono sueco y cono inglés, secados en HC

LIMITES LIQUIDOS
HORNO DE CONVECCION

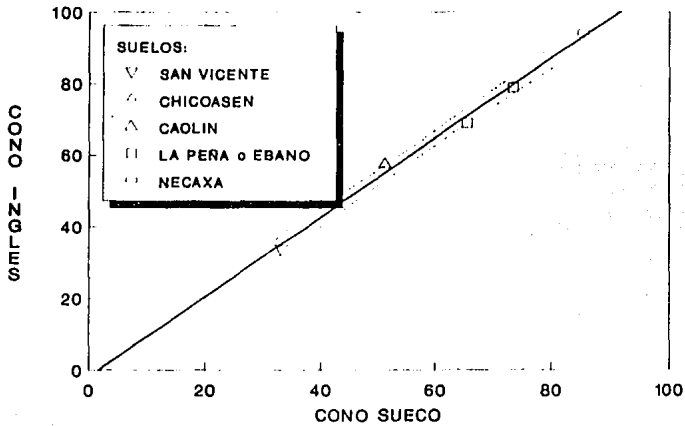


Fig 6.13 Correlaciones entre los límites líquidos menores a 100% de diversos suelos, determinados con el cono sueco y cono inglés, secados en HC

Se observa que el valor de las pendientes y el r prácticamente no cambian, siempre se obtiene que $w_{L\text{cono succo}} < w_{L\text{cono inglés}}$. Las ecuaciones anteriores son más cercanos a la línea de 45°, lo que no sucede para relaciones cono-cona.

b) Secado en el Horno de Microondas

Los resultados de los límites líquidos para ambos conos, usando el HMO son los contenidos en la tabla 6.7. Las ecuaciones de regresión que se obtienen son ligeramente diferentes a las obtenidas en el HMO y son:

$$w_{L\text{cono inglés}} = 1.06686w_{L\text{cono succo}} + 1.01828$$

$$[30\% < w_{L\text{cono succo}} < 305\%] \quad (6.13)$$

$$r = 0.99956$$

Tabla 6.7 Límites líquidos determinados con el cono succo y cono inglés, secados en HMO

	Suelo	Cono inglés HMO	Cono succo HMO	DIF	DIF/ $w_{L\text{SUECO}}$ (%)	y_{reg}
1	SAN VICENTE (SM)	33.67	32.85	-0.82	-2.49619	36.0649
2	CHICOASEN (SC)	35.82	32.83	-2.99	-9.10752	36.0435
3	CAOLIN (CL)	57.45	51.10	-6.35	-12.42661	55.5352
4	LA PEÑA (CH)	67.80	64.75	-3.05	-4.71042	70.0979
5	EBANO SLP (CH)	79.14	73.72	-5.42	-7.35214	79.6677
6	NECAXA (MH)	94.85	85.33	-9.52	-11.15669	92.0540
7	TLAHUAC (CH)	196.56	185.87	-10.69	-5.75133	199.3168
8	BENTONITA II (CH)	220.72	200.40	-20.32	-10.13972	214.8184
9	SAN ANTONIO ABAD	322.87	303.94	-18.93	-6.22820	325.2817
Salida de Regresión::						
	Constante	1.018288				
	Err Estándar Est Y	3.186441	-20.32	-12.4266%	val.mín	
	R Cuadrado	0.999117	-0.82	-2.4961%	val.máx	
	No. de Observaciones	9	-8.676	-7.7076%	val.med	
	Grados de Libertad	7				
	R	0.999558				
	Coefficiente de X	1.066866				
	Err Estándar de Coef.	0.011983				

$$w_{\text{Lcono inglés}} = 1.11138w_{\text{Lcono sueco}} - 1.63068$$

$$[30\% < w_{\text{Lcono sueco}} < 100\%]$$

$$r = 0.99688$$
(6.14)

Cuando se fuerzan a pasar por el origen:

$$w_{\text{Lcono inglés}} = 1.07243w_{\text{Lcono sueco}}$$

$$[30\% < w_{\text{Lcono sueco}} < 305\%]$$

$$r = 0.99954$$
(6.15)

$$w_{\text{Lcono inglés}} = 1.08576w_{\text{Lcono sueco}}$$

$$[30\% < w_{\text{Lcono sueco}} < 100\%]$$

$$r = 0.99660$$
(6.16)

Con ligeras variaciones en sus parámetros, las expresiones anteriores establecen la relación entre los límites líquidos de ambos conos cuando se usa el horno de microondas. Las Figs 6.14 y 6.15 contienen los resultados de los rangos establecidos, junto con las ecuaciones (6.22) y (6.23), respectivamente; en las curvas de confianza se considera $\alpha=0.02$.

LIMITES LIQUIDOS
HORNO DE MICROONDAS

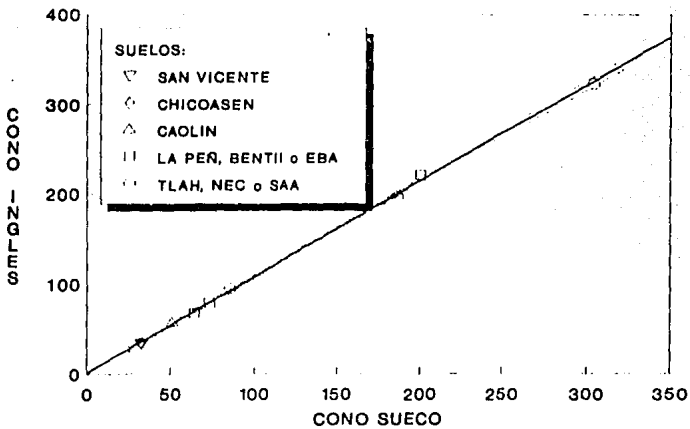


Fig 6.14 Correlación entre los límites líquidos de diferentes suelos, determinados con el cono sueco y cono inglés, secados en HMO

LIMITES LIQUIDOS
HORNO DE MICROONDAS

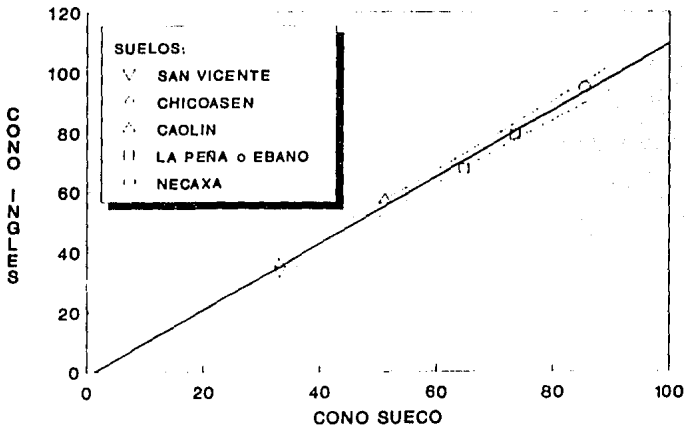


Fig 6.15 Correlación entre los límites líquidos menores a 100% de diversos suelos, determinados con el cono sueco y cono inglés, secados en HMO

6.4.2 Influencia del operador

La influencia del operador en el manejo de la copa y cono sueco ha sido estudiada por *Mendoza (1991b)* que concluye que el usar el cono sueco se tendrá menor influencia del operador, en los resultados para una misma muestra de suelo.

Entre los diferentes factores que afectan los resultados, propios del equipo y causados involuntariamente por operador, se encuentran los siguientes:

copa de Casagrande

- ▶ Variación en las dimensiones estandarizadas
- ▶ Desgaste de su superficie, que dificulta el deslizamiento del suelo
- ▶ Altura de caída
- ▶ Tipo de ranurador (Casagrande o ASTM) y material
- ▶ Dimensiones del ranurador
- ▶ Lugar donde se coloque la copa (sobre una mesa, directorio telefónico, etc.)
- ▶ Ambiente de la prueba (dentro o fuera del cuarto húmedo)
- ▶ Espesor de la muestra en la copa
- ▶ Velocidad con que se aplique el número de golpes
- ▶ La longitud cerrada de la ranura
- ▶ Experiencia del operador
- ▶ Desgaste de la base

conos penetrantes

- ▶ Variación en el peso del cono
- ▶ La posible penetración del cono en el suelo antes de la prueba
- ▶ Variación en el ángulo del cono
- ▶ La posible presencia de burbujas en la masa de suelo que faciliten la penetración del cono
- ▶ Ambiente de la prueba (dentro o fuera del cuarto húmedo)
- ▶ Tiempo para la lectura de la penetración

Generalmente la curva de fluidez se traza *a ojo* por el operador, misma que puede ser diferente a la otra trazada por otra persona. La influencia de un mal ajuste de la curva de fluidez a los datos experimentales ocurre en la copa como en ambos conos, pero puede ser eliminada al utilizar la técnica de ajuste por mínimos cuadrados. Al hacer uso de la técnica de los mínimos cuadrados es posible obtener el valor de r .

La siguiente tabla compara los coeficientes de correlación de pruebas realizadas por diferentes operadores en la copa, cono sueco o el cono inglés, se incluye la experiencia en el manejo del equipo, el número de pruebas realizadas y el rango del $w_{L\text{copa}}$ de éstas.

La dispersión de los resultados de las curvas de fluidez es medida con el coeficiente r ; entonces, de la Tabla 6.8 puede concluirse que para los operadores expertos en el manejo de la copa de Casagrande el valor medio que obtienen es similar al de operadores con nula experiencia (E y F) en el manejo del equipo y es menor a -0.99 . En cambio, tanto para el cono sueco, como para el

como inglés generalmente es mayor a 0.99. Entonces, la prueba de penetración del cono o cono que cae es más sencilla y menos influenciada por el operador, para obtener el límite líquido, que el uso de la copa de Casagrande.

Tabla 6.8 Influencia del operador en el uso de las diferentes técnicas para determinar el w_L .

Operador	r_{min}	r_{max}	r_{med}	Experiencia			rango de w_L (%)	No. pruebas	Técnica
				nula	media	extensa			
A	-0.98265	-0.99945	-0.98408			x	30-350	9	copa(HC)
	-0.98240	-0.99984	-0.98552				30-350	9	copa(HMO)
	0.98203	0.99958	-0.99370				33-304	9	sueco(HC)
	0.98750	0.99904	0.99231				32-304	9	sueco(HMO)
	0.97572	0.99716	0.99131				33-324	9	inglés(HC)
	0.97351	0.99871	0.99039				33-323	9	inglés(HMO)
B	-0.93726	-0.99945	-0.98688			x	22-415	16	copa(HC)
	-0.96397	-0.99971	-0.98557				80-91	6	copa(HMO)
C	-0.92152	-0.99971	-0.98557		x		45-107	7	copa(HMO)
D			-0.99418	x			370	1	copa(HC)
E			-0.99371	x			314	1	copa(HC)
			0.99854				274	1	inglés(HC)
F			-0.98741	x			246	1	copa(HC)
			0.99953				192	1	sueco(HC)
G			-0.98428	x			77	1	copa(HC)
			0.99055				87	1	sueco(HC)

Puede también verse que usando el HMO se tendrán coeficientes de correlación muy similares cuando se usa el HC, para las tres técnicas.

Es por todos conocido que el w_L que se obtiene con la copa es un parámetro inseparable de cualquier suelo fino, porque ha servido y es fundamento, para la clasificación de los suelos con propósitos ingenieriles, aparte de seguir siendo base para correlaciones con diferentes propiedades mecánicas. Con lo expuesto anteriormente, a pesar de ser pocos suelos ensayados, puede decirse que el w_{Lcopa} puede ser inferido a partir del valor obtenido con el cono sueco o bien con el inglés con las expresiones presentadas en este capítulo.

6.4.3 Correlación entre límites líquidos obtenidos en el HMO y HC para la copa de Casagrande, como sueco y como inglés

El uso del cono sueco o inglés junto con el horno de microondas pueden proporcionar el valor del límite líquido en poco menos de una hora.

Análisis estadísticos se llevaron a cabo para establecer las correlaciones entre los parámetros que se reportan en la Tabla 6.9, en donde se resumen los límites líquidos de los diferentes suelos alcanzados en cada técnica y horno.

Tabla 6.9 Límites líquidos de suelos obtenidos con la copa de Casagrande, como sueco y como inglés, para diferentes suelos secados en HC y HMO

Suelo		Copa de Casagrande		Cono sueco		Cono inglés	
		HC	HMO	HC	HMO	HC	HMO
1	SAN VICENTE (SM)	30.61	30.19	33.31	32.85	33.61	33.67
2	CHICOASEN (SC)	31.60	31.81	32.78	32.83	35.49	38.82
3	CAOLIN (CL)	48.37	48.36	51.06	51.10	57.33	57.45
4	LA PEÑA (CH)	70.23	70.56	65.50	64.75	68.81	67.80
5	EBANO SLP (CH)	75.61	75.79	73.31	73.72	78.79	79.14
6	NECAXA (MH)	78.60	79.36	85.33	85.33	94.04	94.85
7	TLAHUAC (CH)	223.61	223.60	184.60	185.87	197.11	196.56
8	BENTONITA II (CH)	280.74	286.48	197.46	200.40	217.17	220.72
9	SAN ANTONIO ABAD	346.34	346.99	303.19	303.94	323.93	322.87

La diferencia entre límites líquidos, $DIF = w_{LHMO} - w_{LHC}$, y la diferencia relativa DIF/w_{LHC} se presenta en las tablas 6.10, 6.11 y 6.12. Se puede observar que sistemáticamente en las tres tablas la diferencia relativa es positiva, y esto indica que $w_{LHMO} > w_{LHC}$, obteniéndose la mínima en el caso del cono sueco (0.076%) y la máxima en la copa (0.353%).

La diferencia máxima resultó ser de +5.74%, en contenido de agua, para el suelo CII-Bentonita II, y la mínima en el suelo SM-San Vicente con -0.42%.

Tabla 6.10 Límites líquidos obtenidos en la copa de Casagrande, para diferentes suelos secados en HC y HMO

Suelo		w_L (%) HC	w_L (%) HMO	DIF	DIF/ $w_{L,HC}$ (%)	y_{req}
1	SAN VICENTE (SM)	30.61	30.19	-0.42	-1.37210	30.2268
2	CHICOASEN (SC)	31.60	31.81	0.21	0.66456	31.8331
3	CAOLIN (CL)	48.37	48.36	-0.01	-0.02067	48.2437
4	LA PEÑA (CH)	70.23	70.56	0.33	0.46988	70.2567
5	EBANO SLP (CH)	75.61	75.79	0.18	0.23806	75.4427
6	NECAXA (MH)	78.60	79.36	0.76	0.96692	78.9826
7	TLAHUAC (CH)	223.61	223.60	-0.01	-0.00447	222.0077
8	BENTONITA II (CH)	280.74	286.48	5.74	2.04460	284.3581
9	SAN ANTONIO ABAD	346.34	346.99	0.65	0.18768	344.3585
Salida de Regresión::						
Constante			0.291037	-0.42	-1.3721%	val.mín
Err Estándar Est Y			1.689327	5.74	2.0446%	val.máx
R Cuadrado			0.999824	0.825	0.3527%	val.med
No. de Observaciones			9			
Grados de Libertad			7			
R			0.999912			
Coeficiente de X		0.991577				
Err Estándar de Coef.		0.004969				

Tabla 6.11 Límites líquidos obtenidos con el cono sueco, para diferentes suelos secados en HC y HMO

Suelo		w_L (%) HC	w_L (%) HMO	DIF	DIF/ $w_{L,HC}$ (%)	y_{req}
1	SAN VICENTE (SM)	33.31	32.85	-0.46	-1.38097	32.9978
2	CHICOASEN (SC)	32.78	32.83	0.05	0.15253	32.9779
3	CAOLIN (CL)	51.06	51.10	0.04	0.07834	51.1092
4	LA PEÑA (CH)	65.50	64.75	-0.75	-1.14504	64.6556
5	EBANO SLP (CH)	73.31	73.72	0.41	0.55927	73.5575
6	NECAXA (MH)	85.33	85.33	0.00	0.00000	85.0794
7	TLAHUAC (CH)	184.60	185.87	1.27	0.68797	184.8563
8	BENTONITA II (CH)	197.46	200.40	2.94	1.48891	199.2760
9	SAN ANTONIO ABAD	303.19	303.94	0.75	0.24737	302.0301
Salida de Regresión::						
Constante			0.397091			
Err Estándar Est Y			0.901192	-0.75	-1.3809%	val.mín
R Cuadrado			0.999918	2.94	1.4889%	val.máx
No. de Observaciones			9	0.472	0.0764%	val.med
Grados de Libertad			7	22		
R			0.999959			
Coeficiente de X		0.992409				
Err Estándar de Coef.		0.003389				

Tabla 6.12 Límites líquidos obtenidos con el cono inglés, para diferentes suelos secados en HC y HMO

Suelo		w_L (%) HC	w_L (%) HMO	DIF	DIF/ w_{LHC} (%)	Y_{reg}
1	SAN VICENTE (SM)	33.61	33.67	0.06	0.17852	33.4585
2	CHICOASEN (SC)	35.49	35.82	0.33	0.92984	35.6067
3	CAOLIN (CL)	57.33	57.45	0.12	0.20931	57.2180
4	LA PEÑA (CH)	68.81	67.80	-1.01	-1.46781	67.5590
5	EBANO SLP (CH)	78.79	79.14	0.35	0.44422	78.8892
6	NECAXA (MH)	94.04	94.85	0.81	0.86134	94.5856
7	TLAHUAC (CH)	197.11	196.56	-0.55	-0.27903	196.2077
8	BENTONITA II (CH)	217.17	220.72	3.55	1.63466	220.3468
9	SAN ANTONIO ABAD	323.93	322.87	-1.06	-0.32723	322.4085
Salida de Regresión::						
Constante		-0.182354				
Err Estándar Est Y		1.470804	-1.06	-1.4678%	val.min	
R Cuadrado		0.999811	3.55	1.6346%	val.máx	
No. de Observaciones		9		0.288	0.2426%	val.med
Grados de Libertad		7		89		
R		0.999905				
Coeficiente de X		0.999135				
Err Estándar de Coef.		0.005182				

Utilizando las expresiones presentadas en el capítulo 4 para calcular los parámetros de la recta de regresión que involucre los w_{LHMO} y w_{LHC} , se establecen las siguientes:

Para la copa de Casagrande:

$$w_{LHC} = 0.99157w_{LHMO} + 0.2910 \quad (6.17)$$

$$[30\% < w_{LHC} < 350\%]$$

$$r = 99991$$

Para el cono sueco:

$$w_{LHC} = 0.99240w_{LHMO} + 0.39709 \quad (6.18)$$

$$[30\% < w_{LHC} < 305\%]$$

$$r = 0.99996$$

Para el cono inglés:

$$w_{LHC} = 0.99913w_{LHMO} - 0.18235$$

$$[30\% < w_{LHC} < 325\%]$$
(6.19)

$$r = 0.99990$$

En general, el coeficiente de correlación, r , es siempre mayor a 0.999 lo que implica tener una fuerte correlación lineal. Las figuras 6.16, 6.17 y 6.18 recogen los datos correspondientes a las tablas anteriores y la recta de correlación calculada.

Finalmente para todos los contenidos de agua utilizados ($N=138$) en la formación de las curvas de fluidez, Fig 6.19, en cada técnica y suelo, la ecuación de regresión calculada es la siguiente:

$$w_{HC} = 0.99723w_{HMO} - 0.11129$$

$$[30\% < w_{HC} < 365\%]$$
(6.20)

$$r = 0.99983$$

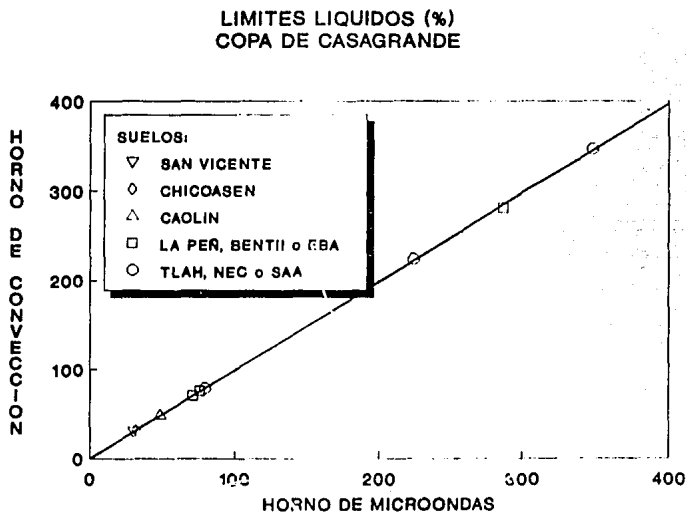


Fig 6.16 Correlación de límites líquidos obtenidos con la copa de Casagrande, secados en HMO y HC

LIMITES LIQUIDOS (%)
CONO SUECO

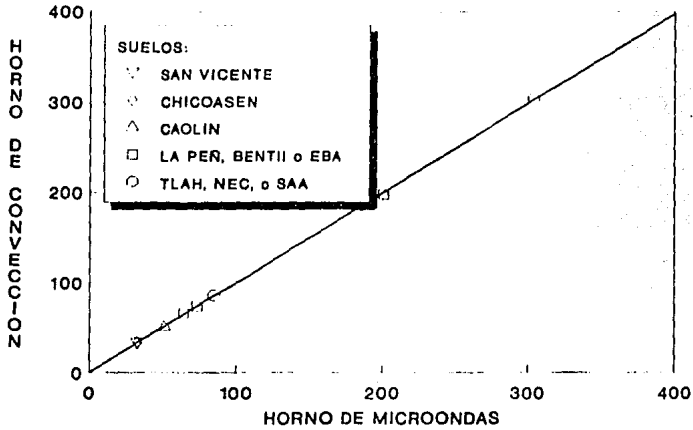


Fig 6.17 Correlación de límites líquidos obtenidos con el cono sueco, secados en HMO y HC

LIMITES LIQUIDOS (%)
CONO INGLES

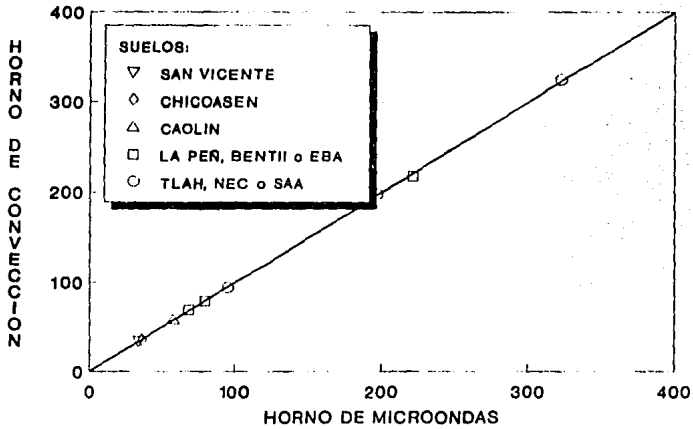


Fig 6.18 Correlación de límites líquidos obtenidos con el cono inglés, secados en HMO y HC

CONTENIDO DE AGUA, w(%)
MICROONDAS vs CONVECCION

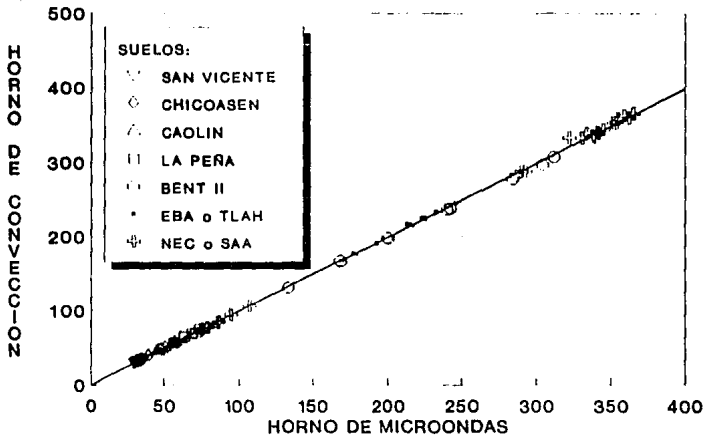


Fig 6.19 Correlación de los contenidos de agua de diferentes suelos, secados el HMO y HC

Es muy similar a la calculada para un número pequeño de muestras ($N=13$) presentada en el capítulo 4, ecuación (4.5), con un rango de w_{HC} de 21% a 395%.

Es claro que el uso del HMO para la determinación del contenido de agua puede facilitar grandemente pruebas de rutina, mejorar los procedimientos de control de calidad (en el caso de la compactación) y minimizar los costos por el uso de otras técnicas de secado.

Es necesario aclarar que en la obtención de ecuación (6.20) se utilizaron muestras de suelo con PHI generalmente menores a 8 g, lo que demuestra que no se requiere utilizar grandes cantidades de suelo (mayores a 100 g) para obtener su contenido de agua.

7. DETERMINACIONES DEL LIMITE LIQUIDO EN SUELOS DE LA CIUDAD DE MEXICO CON LA COPA DE CASAGRANDE Y EL CONO SUECO

En este capítulo se describe un programa experimental cuyo objetivo fue la correlación experimental entre el w_l que se obtiene con la copa de Casagrande y el correspondiente al del cono sueco, en muestras típicas de arcilla de la Ciudad de México. Se presenta el análisis estadístico de los resultados, así como su interpretación.

7.1 Muestras ensayadas, equipo y procedimiento de ensaye

Las muestras ensayadas provienen de diferentes sondeos realizados en la Ciudad de México a diferentes profundidades, Tabla 7.1. La determinación de los límites líquidos se realizaron de acuerdo al método de la copa de Casagrande y el cono sueco, capítulo 6.

Previo al ensaye, los suelos se remodelaron lo suficiente para formar una masa homogénea además de permitirle su tiempo de curado. Si al comienzo el $w(\%)$ era mayor a su límite líquido ($N < 25$ y $d > 10$ mm) el secado fue gradual (al ambiente) para tener mayor número de golpes y menor penetración del cono; en cambio si era menor al límite líquido se le añadía agua destilada.

7.2 Resultados de la investigación

Se incluyen en la Tabla 7.2 los resultados de $w_{l,cono}$, $w_{l,copa}$, su diferencia ($DIF = w_{l,cono} - w_{l,copa}$), la diferencia relativa ($DIF/w_{l,copa}$), así como los resultados del análisis de regresión.

Tabla 7.1 Origen y características de las muestras de arcilla de la Ciudad de México

Muestra	Origen (sondeo)	Prof. (m)	Contenido de agua w_{nat} (%)	w_l (%)	w_p (%)	PI (%)	
1	42-1	Av. Francisco del Paso y Troncoso (FPyT)	26.0	282.68	268.55	74.41	197.14
2	54-3		34.0	260	336.52	91.55	244.97
3	79-3		47.4	190	253.30	85.76	167.54
4	79-3			190	252.50	82.93	169.57
5	83-2		49.6	381.77	354.76	90.34	264.42
6	83-2		49.6	210	351.60	94.79	256.81
7	8-1	Av. División del Norte y Calzada de Tlalpan (DDNyT)	7.2	60	131.78	55.44	76.34
8	12-3		10.8	80	143.43	64.13	79.30
9	27-1		19.0	81.20	101.22	46.00	55.22
10	27-1		19.0	81.20	99.89	47.15	52.74
11	4-3	Av. Xola y División del Norte (XyDDN)	3.9	45	88.33	53.81	34.52
12	14-1		10.9	295.64	404.83	120.37	284.46
13	15-2		11.8	136.65	180.68	75.15	105.53
14	16-1		12.3	165	169.31	78.03	91.28
15	16-1		12.3	165	171.54	75.07	96.47
16	18-2		14.6	110	120.61	47.16	73.45
17	20-3	Frigorífico de la Central de Abasto (CAF)	15.8	170	371.07	99.76	271.31
18	29-3		23.0	191.03	223.19	82.09	148.10
19	29-3		23.0	155	222.35	84.12	138.23
20	43-1		33.7	153.85	179.46	92.77	86.69
21	M1	CAFT1 (Material reconstituido por consolidación)		449.29	384.08	110.13	273.95
22	M2			473.7	378.22	106.27	271.95
23	M3			504.5	380.30	113.00	267.30
24	M1	CAFT2 (Material reconstituido por consolidación)		391.8	384.26	110.13	274.13
25	M2			356.8	390.99	121.00	269.99
26	M3			480.3	405.56	113.80	291.76
27	M1	Lumbrera del costado norte de la Iglesia de San Antonio Abad en el centro de la ciudad (SAA)		375.1	381.81	121.00	260.81
28	M2			356	369.17	126.06	243.11
29	M3			369.23	377.00	119.00	258.00
30	M4			366.23	378.10	131.00	247.10
31	M5			313.5	380.00	128.00	252.00
32	M6			361.3	346.34	81.34	265.00
33	M1		Tláhuac Bombas (TB)		190.0	223.61	55.48

Tabla 7.2 Límites líquidos determinados con el cono sueco y la copa de Casagrande para la arcilla de la Ciudad de México

No.	Mira.	Origen	CONO SUECO (%)	COPA DE CASAGRANDE (%)	DIF (%)	DIF/COPA (%)	Yreg (%)
1	42-1	Fpyt	247.29	271.55	-24.26	8.93390	291.65
2	54-3		275.60	336.52	-60.92	18.10294	326.81
3	79-3		218.58	253.30	-34.72	13.70707	256.00
4	79-3		219.98	252.50	-32.52	-12.87921	257.73
5	83-2		301.30	354.76	-53.46	15.06934	358.72
6	83-2		301.40	351.60	-50.20	14.27759	358.85
7	8-1	DDNyT	122.51	131.78	-9.27	-7.03445	136.60
8	12-3		126.60	143.43	-16.83	-11.73395	141.77
9	27-1		91.71	101.22	-9.51	-9.39538	98.44
10	27-1		91.31	99.89	-8.58	-8.58945	97.95
11	4-3	XyDDN	83.79	88.33	-4.54	-5.13982	88.61
12	14-1		342.04	404.83	62.79	-15.51021	409.11
13	15-2		162.82	180.68	17.86	-9.88488	186.75
14	16-1		150.71	169.31	18.60	-10.98577	171.71
15	16-1		153.56	171.54	-17.98	-10.48152	175.25
16	18-2		111.06	120.61	-9.55	-7.91808	122.47
17	20-3		291.82	371.07	-79.25	-21.35718	346.95
18	29-3		190.70	230.19	-39.49	-17.15539	221.37
19	29-3	192.23	222.35	-30.12	-13.54621	223.27	
20	43-1	162.70	179.46	16.76	-9.33913	186.60	
21	M1	CAFT1	306.65	384.08	-77.43	-20.15986	365.32
22	M2		317.66	378.22	60.56	-16.01184	379.04
23	M3		318.38	380.30	61.92	-16.28188	379.93
24	M1	CAFT2	341.82	384.26	-42.44	-11.04481	409.04
25	M2		323.90	390.99	-67.09	-17.15901	386.79
26	M3		312.59	405.56	92.97	22.92388	372.74
27	M1	SAA	336.39	381.81	-45.42	-11.89597	402.30
28	M2		287.32	369.17	-81.85	-22.17136	341.36
29	M3		316.26	377.00	-60.74	-16.11141	377.30
30	M4		320.55	378.10	57.55	-15.22084	382.63
31	M5		323.33	380.00	-56.67	-14.91316	386.08
32	M6		303.19	346.34	43.15	-12.45886	361.07
33	M1	TB	184.60	223.61	-39.01	-17.44555	213.80
Salida de regresión:					92.97	22.92386	valor mínimo
Constante					-15.44686	41.94	valor medio
Err. Estándar Est. Y					12.769359	-8.91390	valor máximo
R cuadrado					0.986722		
No. de observaciones					33		
Grados de libertad					31		
R					0.993338		
Coeficiente de X					1.241848		
Err. Estándar de Coef.					0.025873		

La relación entre el $w_{L\text{copa}}$ y el $w_{L\text{cono sueco}}$ esta dada por la siguiente ecuación:

$$w_{L\text{copa}} = 1.2418w_{L\text{cono}} - 15.4468$$

$$[88\% < w_{L\text{copa}} < 406\%] \quad (7.1)$$

$$r = 0.9933$$

Los valores del w_L que se obtienen al usar el cono sueco no son enteramente iguales a los que proporciona la copa, pero si linealmente correlacionados; el valor de $r = 0.9933$ indica la validez de la correlación. Es importante hacer notar que la ecuación (7.1) es similar a las presentadas en el capítulo 3 [ecs (3.1), (3.2), (3.10) y (3.11)] y 6 [ecs (6.1) y (6.3)] obtenidas con el mismo equipo para diferentes suelos y similar rango de valores del $w_{L\text{copa}}$.

La representación gráfica de los resultados de ambas técnicas se presenta en la Fig 7.1, se incluye además la recta de correlación y los intervalos de confianza para $\alpha = 0.02$. Los resultados muestran que al aumentar el $w_{L\text{cono}}$, la diferencia crece, el valor de la diferencia media es de -13.78%, y en general el $w_{L\text{copa}} > w_{L\text{cono}}$, coinciden ambos valores cuando el $w_L = 64\%$.

7.3 Ubicación de las muestras en la carta de plasticidad

La ubicación de las muestras ensayadas en la carta de plasticidad se hace con los pares coordenados $(x, y) = (w_{L\text{copa}}, PI)$; el análisis estadístico del total de pares coordenados permite establecer la siguiente ecuación:

$$PI = 0.7863 (w_{L\text{copa}} - 38.833)$$

$$[88\% < w_{L\text{copa}} < 406\%] \quad (7.2)$$

$$r = 0.9915$$

Marsal y Mazari (1969) presentan la siguiente ecuación obtenida con un mayor número de ensayos (7 750) y por consiguiente es más representativa para la arcilla del valle de México:

$$PI = 0.84(w_L - 46)$$

$$r = 1.00 \quad (7.3)$$

LIMITES LIQUIDOS (%)
CONO SUECO vs COPA DE CASAGRANDE
HORNO DE CONVECCION
SUELOS DE LA CIUDAD DE MEXICO

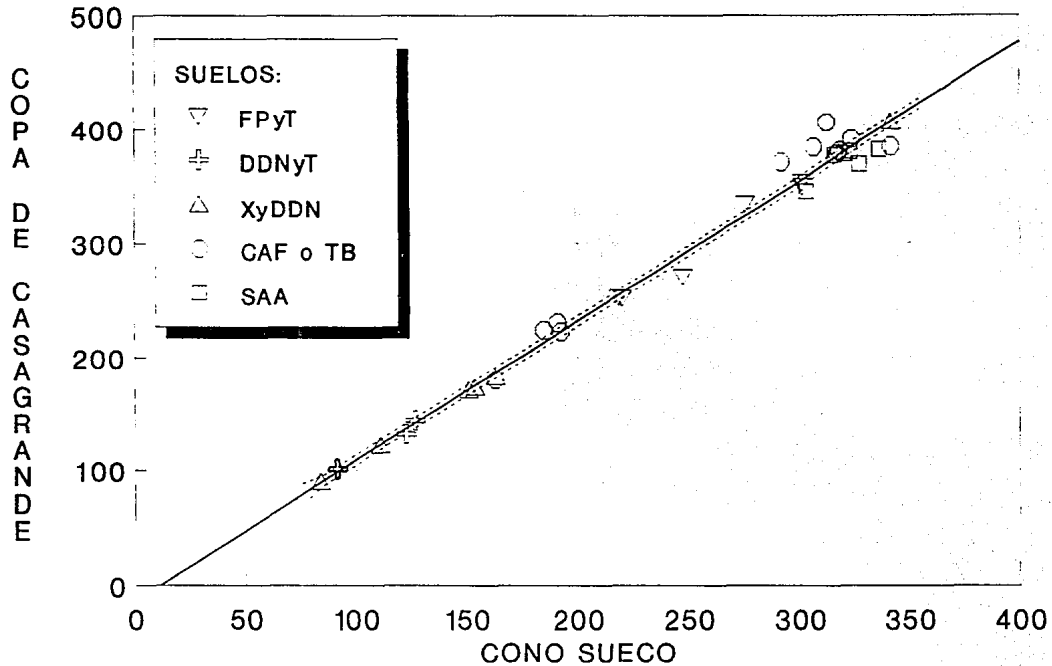


Fig 7.1 Correlación entre los límites líquidos para diferentes muestras de arcilla de diferentes sitios de la Ciudad de México, obtenidos con el cono sueco y la copa de Casagrande, secados en HC

La línea "A" de Casagrande tiene por ecuación:

$$PI = 0.73(w_L - 20) \quad (7.4)$$

La representación gráfica de los valores y las ecuaciones anteriores se presenta en la Fig 7.2. Puede verse que cuando el $w_{L\text{opt}}$ es menor a 150%, los resultados de la ecuación (7.2) son similares a los de la (7.3) y para $w_{L\text{opt}} > 200\%$ a la ecuación (7.3).

Al correlacionar el límite líquido del cono sueco con el valor de PI calculado con éste ($PI = w_{L\text{cono sueco}} - w_p$), la ecuación que los liga resulta:

$$PI = 0.7345(w_{L\text{cono sueco}} - 37.06)$$

$$[80\% < w_{L\text{cono sueco}} < 350\%] \quad (7.5)$$

$$r = 0.9841$$

Los resultados del $w_{L\text{cono sueco}}$ y $PI_{\text{cono sueco}}$ se muestran en la Fig 7.3; se observa que la ecuación (7.5) es prácticamente paralela a la línea A de Casagrande, la distancia vertical entre las rectas es de aproximadamente 11.5% (Fig 7.3).

Con lo expuesto anteriormente se establece que la clasificación de la arcilla de la Ciudad de México en base a la carta de plasticidad, puede hacerse utilizando el límite líquido que el cono sueco proporciona. Su uso implica que tanto el límite líquido y el PI sean menores, en comparación a los valores que puede arrojar la copa. La ubicación de la arcilla en la carta de plasticidad se mantiene proporcionalmente a la establecida por la ecuación (7.3).

7.4 Correlación entre el HMO y HC

La Tabla 7.3 y la Fig 7.4 incluyen las 50 muestras de arcilla secadas en el HMO y HC; éstas fueron utilizadas para formar las curvas de fluidez y determinar el límite líquido correspondiente. El PHI de cada muestra generalmente fue menor de 10 g, de ahí la importancia de la correlación entre los contenidos de agua alcanzados en ambos hornos; la ecuación resultante es:

$$w_{HC} = 1.0022w_{HMO} - 0.0697$$

$$[30\% < w_{HMO} < 375\%] \quad (7.6)$$

$$r = 0.99932$$

CARTA DE PLASTICIDAD
COPA DE CASAGRANDE
SUELOS DE LA CIUDAD DE MEXICO

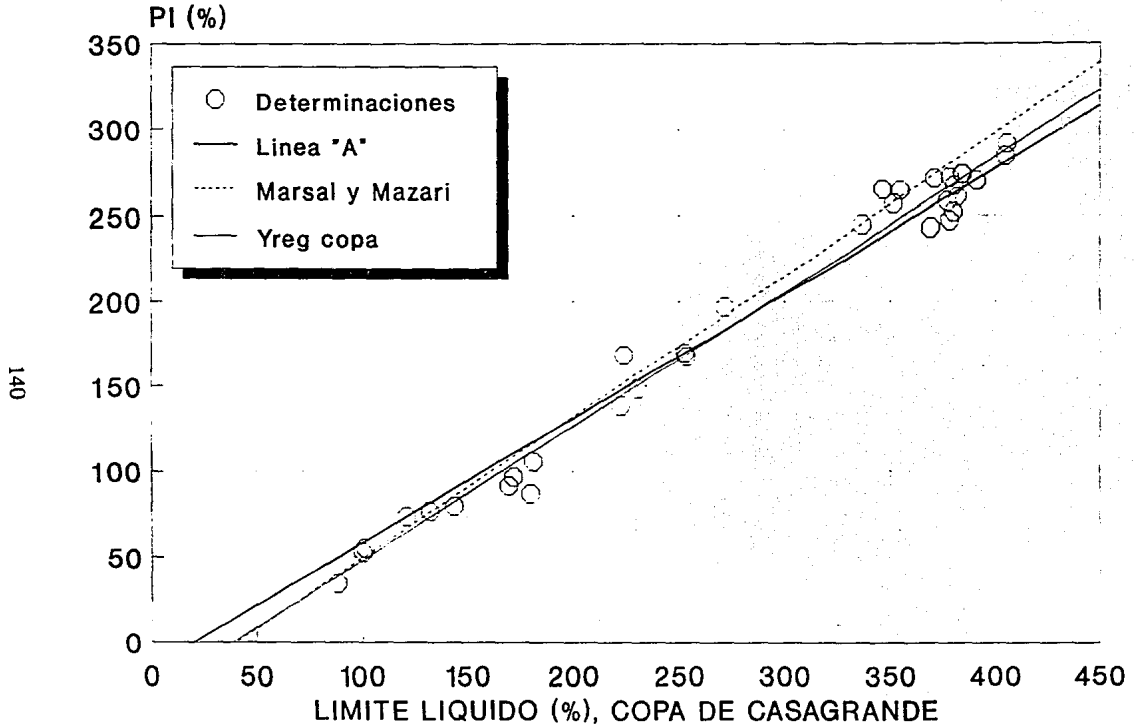
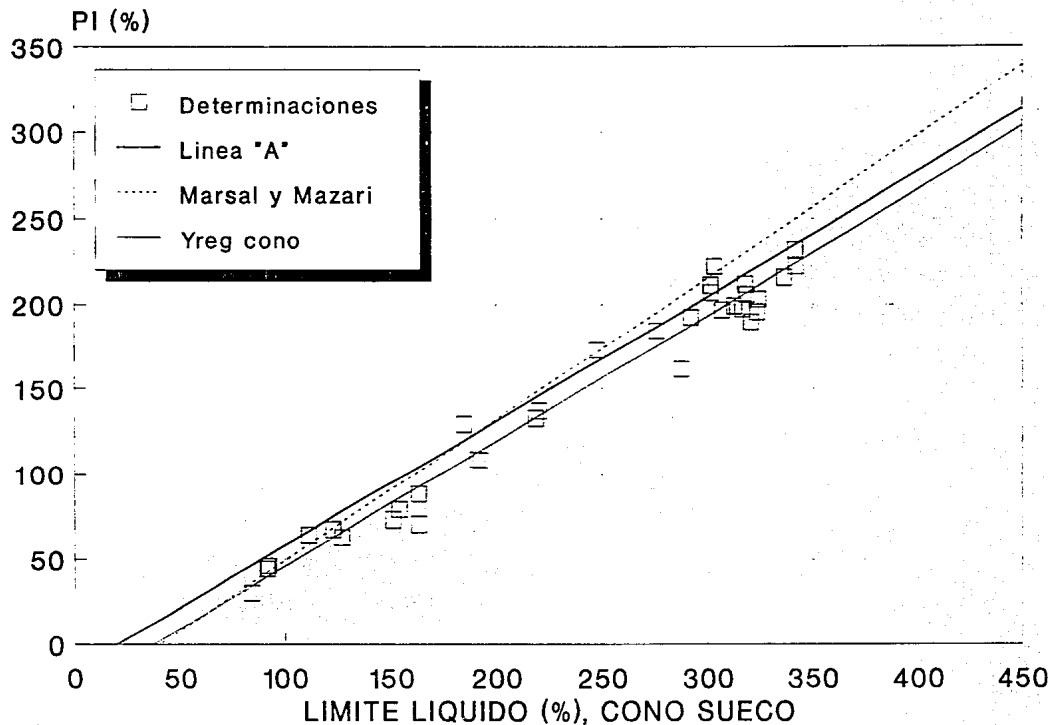


Fig 7.2 Ubicación de las muestras de arcilla provenientes de diferentes sitios de la Ciudad de México en la carta de plasticidad, copa de Casagrande

CARTA DE PLASTICIDAD CONO SUECO

SUELOS DE LA CIUDAD DE MEXICO



141

Fig 7.3 Ubicación de las muestras de arcilla provenientes de diferentes sitios de la Ciudad de México en la carta de plasticidad, cono sueco

Tabla 7.3 Contenidos de agua de la arcilla de la Ciudad de México determinados en HC y IIMO

Suelo		No de muestra	w(%) HC	w(%) HMO	DII ²	DIF/w _{HC} (%)	Y _{reg}
1	Av. PPy T	83-2	304.28	314.15	9.87	3.24307	314.7995
2		83-2	343.89	333.52	-10.37	-3.0155	334.2138
3	DDNyT	19-1	30.61	31.05	0.44	1.43744	31.0514
4		19-1	38.82	39.01	0.19	0.48944	39.0296
5		27-1	73.29	73.29	0.00	0.00000	73.3881
6		12-3	102.93	100.93	-2.00	-1.94307	101.0913
7		12-3	111.66	110.59	-1.07	-0.95827	110.7734
8		12-3	147.14	145.62	-1.52	-1.03303	145.8836
9	XyDDN	4-3	85.02	85.19	0.17	0.19995	85.3153
10		4-3	96.46	103.85	7.36	7.62773	104.0180
11		15-2	141.46	139.68	-1.78	-1.25831	139.9300
12		15-2	175.61	172.26	-3.35	-1.90764	172.5846
13		14-1	316.97	308.91	-8.06	-2.54283	309.5475
14	CAF	43-1	143.17	140.49	-2.68	-1.87190	140.7419
15		3-1	141.72	140.92	-0.80	-0.56449	141.1729
16		43-1	166.85	165.21	-1.64	-0.98292	165.5185
17		20-3	193.92	193.23	-0.69	-0.35582	193.6026
18			259.29	254.82	-4.47	-1.72394	255.3336
19	San Antonio Abad		286.84	288.97	2.13	0.74257	289.5618
20			288.00	291.78	3.78	1.31250	292.3782
21			331.70	321.85	-9.85	-2.96955	322.5171
22			332.16	330.61	-1.55	-0.46664	331.2971
23			337.75	333.23	-4.52	-1.33827	333.9231
24			334.89	337.90	3.01	0.89880	338.6038
25			333.79	338.58	4.79	1.43503	339.2854
26			340.34	340.47	0.13	0.03820	341.1797
27			338.32	341.80	3.48	1.02861	342.5127
28			343.09	344.43	1.34	0.39057	345.1488
29			352.31	351.25	-1.06	-0.30087	351.9844
30			353.16	353.22	0.06	0.01699	353.9589
31			358.77	354.43	-4.34	-1.20969	355.1717
32			361.83	358.55	-3.28	-0.90650	359.3031
33			359.31	361.81	2.50	0.69578	362.5686
34			364.91	364.53	-0.38	-0.10414	365.2948
35			372.50	374.82	2.32	0.62282	375.6083
36	Tláhuac bombas		167.16	168.34	1.18	0.70591	168.6557
37			168.85	170.34	1.49	0.88244	170.6602
38			177.25	175.70	-1.55	-0.87447	176.0325
39			175.98	178.05	2.07	1.17627	178.3879
40			190.99	191.69	0.70	0.36651	192.0591
41			190.40	191.92	1.52	0.79832	192.2896
42			216.97	213.08	-3.89	-1.79287	213.4981
43			215.94	214.73	-1.21	-0.56034	215.1519
44			215.41	216.49	1.08	-0.50137	216.9159
45			225.03	223.24	-1.79	-0.79545	223.6813
46			225.23	224.35	-0.88	-0.39071	224.7939
47			223.50	225.26	1.76	0.78747	225.7060
48			233.09	232.22	-0.87	-0.37325	232.6819
49			234.04	232.31	-1.73	-0.73919	232.7721
50			245.19	245.75	0.56	0.22839	246.2429

Salida de regresión				
Constante	-0.0697	-10.37	-3.0155	val.min
Err estándar Est Y	3.6311	9.87	7.62773	val.med
R cuadrado	0.9986	-0.47	-0.10706	val.máx
No. de observaciones	50			
Grados de libertad	48			
R	0.99932			
Coefficiente de X	1.00229			
Err Estándar de Coef.	0.00532			

Si la ecuación de correlación se fuerza a pasar por el origen, se obtiene:

$$w_{HC} = 1.0020w_{HMO}$$

$$[30\% < w_{HMO} < 350\%] \quad (7.7)$$

$$r = 0.99932$$

Las ecuaciones anteriores relacionan linealmente y con una fuerte dependencia (prácticamente de 1.0) los contenidos de agua alcanzados con el HMO y HC, demostrando que no se requiere gran cantidad de suelo para ser secado en el HMO, basta con poco menos de 10 g para tal propósito.

**CONTENIDO DE AGUA (%)
MICROONDAS VS CONVECCION
SUELOS DE LA CIUDAD DE MEXICO**

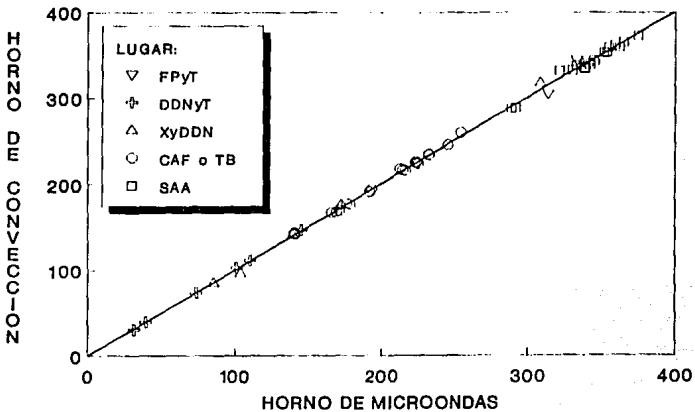


Fig 7.4 Correlación existente de contenidos de agua de la arcilla de la Ciudad de México determinados con el HMO y HC

8. LA PENETRACION DEL CONO SUECO PARA MEDIR LA RESISTENCIA NO DRENADA

8.1 Antecedentes

Los problemas de deslizamiento en líneas de ferrocarriles y la falla de taludes, llevó a la Directiva Real de los Ferrocarriles Suecos a formar una comisión para investigar el riesgo del deslizamiento de tierras y encontrar los medios para estabilizar los terraplenes. Dicha comisión fue nombrada como *La Comisión Geotécnica de los Ferrocarriles Estatales Suecos* y en la que *John Olsson* fungía como secretario.

Olsson mostró a la comisión un método para la determinación experimental de la resistencia al esfuerzo cortante de las arcillas, como una adaptación a la prueba de la esfera (*Swedish Brinell Hardness*), que se presionaba en el material por ensayar. Anteriormente *Fellenius* construyó un aparato de corte directo pero nunca fue satisfactorio.

En resumen, el cono inicialmente fue propuesto para medir la resistencia cortante en los suelos arcillosos, con el objeto de determinar parámetros para solucionar los problemas de los deslizamientos de los terraplenes (*Bjerrum y Flodin, 1960*) y tomado después para determinar el límite líquido de los suelos.

8.2 Comparación entre los métodos del cono y la veleta

Hansbo (1957) encontró experimentalmente que para materiales finos remoldeados, la relación que existe entre la resistencia al esfuerzo cortante no drenada, c_u (ton/m²), y la profundidad de

penetración, d (mm), para un cierto cono de masa m (g) y con un ángulo de su ápice α es:

$$c_u = k(\alpha, \kappa) \frac{m g}{d^2} \quad (8.1)$$

donde

- κ es la medida de la fricción entre el suelo y el cono (fricción o adhesión) y que depende del acabado del cono
- g aceleración de la gravedad, $g = 9.81 \text{ m}^2/\text{s}$

La función $k(\alpha, \kappa)$ depende principalmente del ángulo del cono, por lo que la ecuación (8.1) puede escribirse como:

$$c_u = k_\alpha \frac{m g}{d^2} \quad (8.2)$$

Wood y Wroth (1978) obtuvieron la misma expresión realizando un análisis dimensional. Los análisis mencionados han permitido definir que en el límite líquido de los suelos, se tiene una resistencia estándar.

Para obtener k_α se correlacionan los resultados de penetración del cono y la determinación de la resistencia no drenada obtenida mediante la veleta de laboratorio. Tres diferentes veletas (de 1.5, 3.0 y 4.5 cm de diámetro todas con un altura de dos veces su diámetro) se usaron para correlacionar ambos métodos (Karlsson, 1961). Con diferentes contenidos de agua de un mismo material, Karlsson realizó pruebas con diferentes velocidades de rotación en la veleta. La veleta se hace penetrar en el suelo y por medio de un par o momento torsionante aplicado manualmente o con motor, provoca la falla del suelo cercano a las orillas de las navajas.

En el caso de la investigación realizada por Wood y Wroth (1985), la veleta esta formada por tres cuchillas de forma triangular y sección romboidal, con radio de 12.5 mm, que cuando se gira en un suelo con resistencia al esfuerzo cortante no drenada de 100 kPa se genera un par de 0.5 N-m. Un cono de 80 g de peso con 30° en su punta, *cono inglés*, fue el usado por los investigadores. Cuando el cono penetra en la muestra de suelo 20 mm se dice que se encuentra en su límite líquido.

Karlsson (1961) muestra curvas de calibración para dos conos, de 30° y 60°, en materiales diferentes relacionando el parámetro mg/d^2 con c_u (kg/cm^2), Fig 8.1 y 8.2. De acuerdo a los resultados presentados por Karlsson, el valor de k_α varía con las propiedades del suelo. La Fig 8.3 muestra la relación entre el índice de plasticidad con el valor de k_α para ambos conos y en la Fig 8.4 la relación del cociente

$$\frac{f(m, g, d)_{cono\ 60^\circ}}{f(m, g, d)_{cono\ 30^\circ}} = \frac{\left(\frac{m}{d^2}\right)_{60^\circ}}{\left(\frac{m}{d^2}\right)_{30^\circ}} \quad (8.3)$$

con el valor de k_α . El cociente es el valor medio de las determinaciones hechas para los diferentes contenidos de agua en una misma muestra de suelo. De la Fig 8.2b puede verse que para cierto cono con un ángulo entre 30° y 60°, el valor de k_α , dependerá grandemente de las propiedades del material y poco del propio ángulo del cono.

Los valores de k_α reportados por los autores antes mencionados son los que se presentan en la Tabla 8.1; se puede observar que existe poca diferencia en los valores.

Tabla 8.1 Valor de la constante k_α para muestras remoldeadas, obtenidas por calibración con veleta

Autor	α (°)	k_α
Karlsson (1981)	30	0.80
	60	0.27
Wood (1985)	30	0.85
	60	0.29

Con los valores de k_α presentados en dicha tabla, se puede calcular la resistencia al esfuerzo cortante no drenada utilizando la expresión (8.2) para los diferentes conos, Tabla 8.2.

Para el cono sueco, *Karlsson (1981)* estableció que en el límite líquido de los suelos, la resistencia de los suelos es de 1.7 kPa. *Wood y Wroth (1978)* sugieren que la resistencia para los suelos remoldeados en su límite líquido, usando el cono de 80 g/30°, la resistencia es de 1.7 kPa. Ambas definiciones del límite líquido, sueca e inglesa, indican que para propósitos prácticos la resistencia al esfuerzo cortante sea de 2 kPa. Recuérdese que la resistencia al esfuerzo cortante que se obtiene usando la copa de Casagrande, en el límite líquido, es de 2.5 kPa.

De lo anterior puede desprenderse que las diferencias entre ambas definiciones son insignificantes, por lo que demuestra la bondad de los conos penetrantes como instrumentos convenientes para medir la resistencia cortante de las arcillas, además de su límite líquido.

Conociendo el valor de k_α se puede emplear el cono sueco o el inglés para determinar la resistencia cortante no drenada en muestras inalteradas, como bien la pueden proporcionar los torcómetros manuales o la veleta, con el solo hecho de permitir su penetración en las superficies

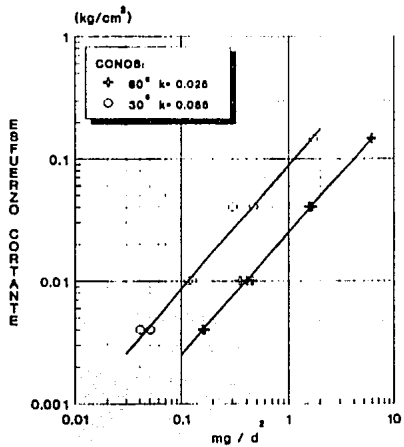
Tabla 8.2 Valor de c_u para los conos de 60 g/20° y 80 g/30° calculados con la expresión (8.2)

Cono	Penetración para obtener el $w_{L,cono}$ (mm)	k_α	c_u (kPa)
60 g/60°	10	Karlsson 0.27	1.59
		Wood 0.29	1.71
80 g/30°	20	Karlsson 0.80	1.57
		Wood 0.85	1.67

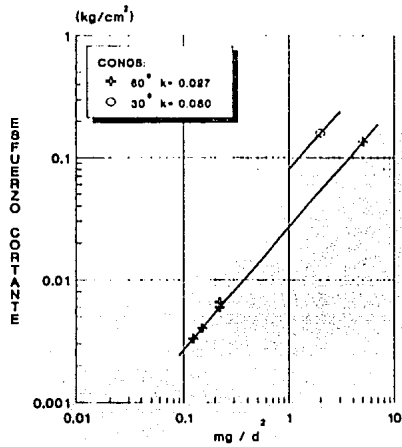
recién cortadas. La c_u estará en función de la penetración del cono, de su masa y del coeficiente k_α (ecuación 8.2). Un estudio detallado lo presenta *Hansbo (1957)* en donde relaciona la resistencia no drenada de arcillas con la profundidad de penetración de diferentes conos.

Haciendo uso del cono es también posible tener una medida de la sensibilidad, relacionando la c_u del suelo inalterado con la correspondiente de la muestra remoldeada.

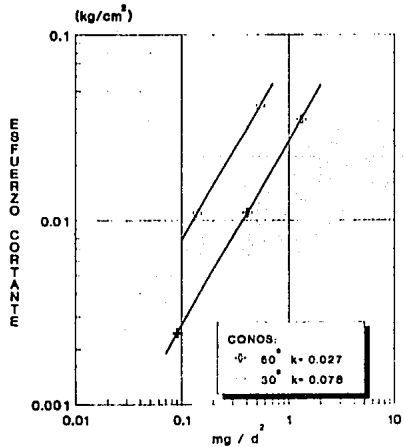
MUESTRA No. 78, BENTONITA
CURVAS DE CALIBRACION
CONOS SUECOS



MUESTRA No. 81, ARCILLA POST-GLACIAL
CURVAS DE CALIBRACION
CONOS SUECOS



MUESTRA No. 79, CAOLIN
CURVAS DE CALIBRACION
CONOS SUECOS



MUESTRA No. 90, CAOLIN
CURVAS DE CALIBRACION
CONOS SUECOS

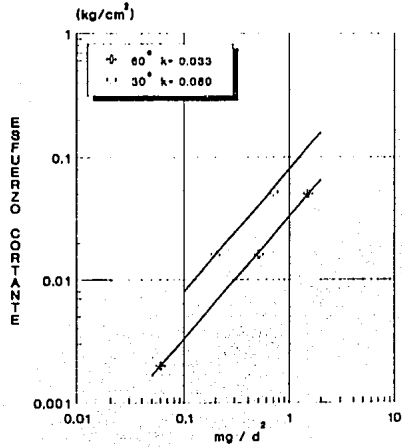
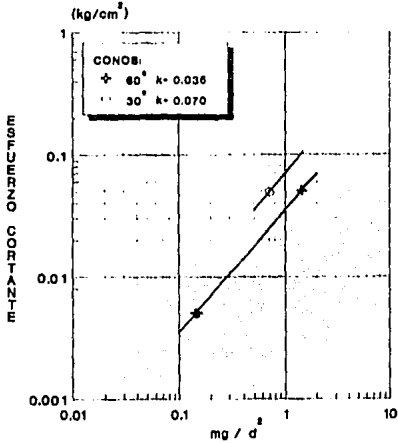


Fig 8.1 Correlación entre el esfuerzo cortante obtenido con veleta y el parámetro mg/d^2 de la prueba de cono (Karlsson, 1961)

MUESTRA No. 80, LIMO GRUESO CON MATERIA
CURVAS DE CALIBRACION
CONOS SUECOS



MUESTRA No. 84, MUD (FANGO)
CURVAS DE CALIBRACION
CONOS SUECOS

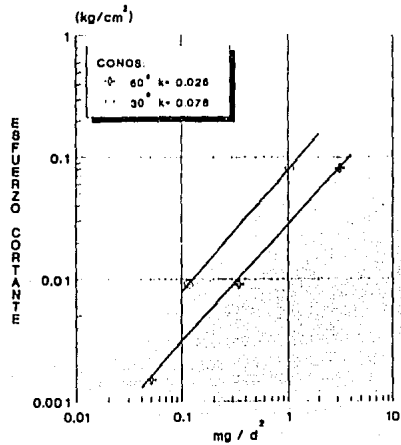


Fig 8.2 Correlación entre el esfuerzo cortante obtenido con veleta y el parámetro mg/d^2 de la prueba de cono (Karlsson, 1961)

INDICE DE PLASTICIDAD vs k

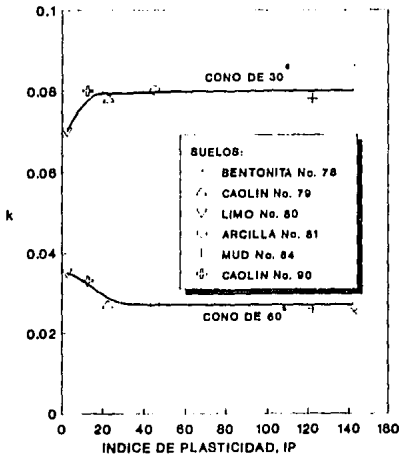


Fig 8.3 Influencia del suelo en el valor de k en la ecuación (8.2) de la prueba de cono (Karlsson, 1961)

$f(mg, d)_{\text{cono } 60^\circ} / f(mg, d)_{\text{cono } 30^\circ}$ vs k

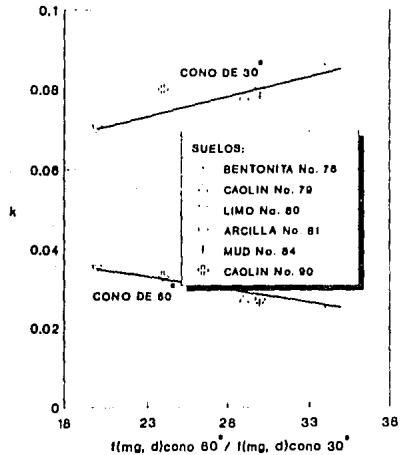


Fig 8.4 Cociente de la ecuación (8.3) vs k (Karlsson, 1961)

9. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se dan, se basan en el trabajo experimental junto con la aplicación de modelos estadísticos para la interpretación de los resultados.

Contenido de agua

Se han revisado técnicas alternativas a la *tradicional* (HC) para el secado de suelos, mismas que fácilmente se pueden implementar incluso en campo. Este análisis involucró suelos representativos de las cuatro regiones típicas de la carta de plasticidad, por lo que las conclusiones aquí señaladas deben considerarse de naturaleza general y aplicable para prácticamente todos los suelos.

Las técnicas de secado se ordenan atendiendo al valor creciente de la dispersión de los resultados respecto a su media: HC, HMO, técnica del alcohol, técnica de secado intensivo en estufa y técnica del tolueno; sin embargo, cabe aclarar que las diferencias de los resultados entre ellas es muy pequeña, como se puede ver al comparar las diferentes tablas de resultados (4.6 a 4.10) o las ecuaciones de regresión (inciso 4.4). Lo anterior da como resultado que las correlaciones de los contenidos de agua (de muestras con PHI igual a 30 g) de las técnicas alternativas y la tradicional (HC) sean prácticamente rectas a 45°, con coeficientes de correlación generalmente mayores a 0.9999.

En lo referente a la facilidad de operación puede establecerse el siguiente orden, de acuerdo a la experiencia de quien escribe: HC, HMO, Técnica del secado intensivo en estufa, Técnica del tolueno y finalmente la Técnica del alcohol.

Técnica de la estufa

El tiempo necesario para alcanzar el peso seco, de muestras con PHI de 30 g, utilizando la técnica de la estufa, puede ser desde pocos minutos (11 en el caso del suelo SC-Chicoasén y w de 32%), hasta cerca de 40 minutos, para una CH-Bentonita con un w de 236%. La Tabla 4.3 incluye diferentes suelos y el respectivo tiempo necesario para el secado.

La técnica del secado intensivo no se dificulta, pues basta colocar la muestra del suelo en una lata y someterla directamente a la fuente de calor, que puede ser una estufa del tipo casero, quemador o una simple fogata hecha con leños. Se considera que el suelo está seco cuando la diferencia entre dos pesadas sucesivas de la misma lata es igual o menor a 0.3 g. La primera determinación del peso de la lata puede hacerse a los 10 minutos y posteriormente a intervalos de tiempo menores y así observar el cambio de su peso.

La correlación entre los contenidos de agua de esta técnica y los determinados con el HC es lineal, aunque son siempre mayores los primeros debido al sobrecalentamiento del suelo que ocasiona la eliminación no sólo del agua libre. El establecer que sean 30 g de PHI y que la prueba termine cuando la diferencia sea de 0.3 g es para que los contenidos de agua sean prácticamente iguales a los del HC (Tabla 4.3).

Técnica del alcohol, basado en su combustión

Para la técnica del alcohol los resultados obtenidos son generalmente mayores a los determinados con en el HC, pero correlacionados linealmente [ecuación (4.11) y Tabla 4.4]. El tiempo que se requiere para secar muestras de suelo va de 19 a 51 minutos; que corresponden al SC-Chicoasén con contenido de agua de 20% y la arcilla de la Ciudad de México con 405%. El PHI utilizado fue de 30 g.

Se demuestra que no se requieren grandes cantidades de PHI para ser secadas como varios autores sugieren (*Entran, J. D. et al, 1970*). La cantidad total de alcohol requerida puede estimarse en función del peso de agua que contiene la muestra, estimado por el operador, al utilizar la ecuación (4.12) o bien multiplicar el peso de agua estimado por 3 (Fig 4.9).

Técnica del tolueno

Se demuestra que existe una correlación lineal de los contenidos de agua de esta técnica y los correspondientes obtenidos con HC [ecuación (4.13)]. Sin embargo, la dispersión de los resultados es mayor (Tabla 4.10). Las muestras de suelo utilizadas en ambas técnicas fueron de 30 g.

Cada suelo requiere tiempo diferente para alcanzar el volumen constante de agua (el que se mide directamente en la trampa de destilación) y es de 24 a 51 minutos en algunos casos (Tabla 4.5). Éstas resultan ser similares a los empleados con la técnica del alcohol.

Es claro que el uso de las diferentes técnicas de secado expuestas en este trabajo estará de acuerdo a la disponibilidad del equipo. Para el uso del HC y HMO es necesario contar con corriente eléctrica, mientras que en la del alcohol sólo se requiere verterlo y mezclarlo con la muestra de suelo para que durante su combustión elimine agua, o utilizar una pequeña estufa casera (ya sea de gas, petróleo o simplemente leños para hacer una fogata). Finalmente, en la técnica del tolueno se necesita equipo poco común en un laboratorio de Mecánica de Suelos (trampa de destilación, columna de enfriamiento, matraz) y corriente eléctrica para una parrilla.

Horno de microondas

Se demuestra que el uso del HMO, con potencia de secado de 10, para la determinación del contenido de agua de los suelos, facilita y acelera grandemente pruebas de rutina, además de ser un procedimiento barato y tan confiable como lo puede ser la técnica convencional.

La productividad de resultados en el uso del HMO se aumentó en este estudio al secar en forma simultánea por lo menos cuatro muestras de un mismo suelo. Para muestras con PHI entre 5 y 200 g se requirieron entre 3 y 48 minutos (Tabla 5.3) y con PHI de 30 g el tiempo requerido estuvo comprendido entre 5 y 13 minutos (Tabla 4.2).

Cuanto menor es el PHI, la dispersión que se alcanza es notable (Fig 5.11) y tiende a ser constante a partir de 100 g. Para ciertas técnicas, por ejemplo la prueba del límite líquido, se requiere utilizar aproximadamente 8 g de material lo que trae como consecuencia que las dispersiones esperadas en los resultados sean altas, pero para fines prácticos estos valores son iguales si se utiliza el HMO o el HC (Fig 5.10 y 5.11).

No se requieren pesos húmedos iniciales tan altos (entre 100 y 200 g), como los que recomienda *Gilbert (1991)*, para obtener el contenido de agua de los suelos, puesto que la dispersión de los resultados no es característica propia del HMO, existe también en el HC, Fig 5.10 a 5.13; entonces, no debe pensarse que al utilizar el HMO o el HC para secar muestras de suelos idénticas se obtengan resultados iguales.

El HMO utilizado tiene la facilidad de operar a diferentes niveles de potencia; teniendo esta opción se pueden secar suelos sin recurrir a la potencia total. Para aquellos suelos que contienen ferromagnesianos se recomienda no utilizar la potencia total, puesto que pueden sufrir calentamiento excesivo y posible explosión durante el secado; por lo tanto, la alternativa es secarlo en forma gradual con potencia menor (4 ó 5) provocando se incremente el tiempo para el secado total.

La ecuación (6.20) correlaciona contenidos de agua alcanzados en HC y HMO de muestras que se involucraron en las curvas de fluidez (tanto de copa, cono sueco y cono inglés), para un intervalo de 30% a 365%. En cambio la ecuación (4.5) es una correlación utilizando muestras con PHI de 30 g. Los coeficientes de correlación son de 0.99983 y 0.99990, respectivamente, indicando así la excelente correlación lineal.

El tiempo requerido para obtener el peso seco de las muestras depende de la cantidad de agua por remover, Tabla 5.1 y 5.3, La determinación de peso seco de los suelos con el HMO puede realizarse en las etapas siguientes: secado continuo de la muestra con tiempo inicial máximo de 5 minutos y la segunda etapa con monitoreo a intervalos de tiempo menores. Resulta claro que cuanto mayor cantidad de agua tenga el PHI se requerirá mayor tiempo para el secado (Tabla 5.3 y 5.5). Otra forma de estimar el tiempo total de secado es emplear la ecuación presentada por *Mendoza (1991c)* que esta precisamente en función del peso de agua, la primera etapa será entonces un tiempo relativamente menor al calculado con dicha ecuación y posteriormente el monitoreo continuo.

El secado de más de 640 muestras de suelo en cada horno, HC y HMO, de diferentes suelos y contenidos de agua, permitieron establecer correlaciones estadísticas lineales generales para los suelos, puesto que los aquí presentados son representativos de las cuatro regiones principales de la carta de plasticidad.

Todos los hornos de microondas de tipo casero se basan en el mismo principio (inciso 2.2.8) y operan a una frecuencia específica (2450 MHz). Lo anterior favorece para utilizar cualquier horno de microondas para secar muestras de suelo.

En el caso de la compactación en campo, la rápida obtención del contenido de agua adquiere mayor significado técnico y económico. El uso del HMO permitirá tener y llevar un control más eficiente de los suelos por compactar, puesto que se tendrían en el momento del tendido elementos para aceptar o modificar las condiciones de humedad, de tal manera que caigan en el intervalo preestablecido.

Uso del HMO en la arcilla de la Ciudad de México

Para un número importante de muestras (50) de arcilla típica de la Ciudad de México, se obtuvo una correlación lineal [ecuación (7.6)] que liga los contenidos de agua alcanzados con el HMO y los correspondientes del HC. El rango de esta correlación es de 30% a 375% de contenido de agua. Es importante señalar que los PHI involucrados fueron generalmente menores a 10 g, lo que parece demostrar nuevamente la utilidad práctica del HMO.

Límite líquido

Se han expuesto técnicas alternativas para determinar el límite líquido de los suelos, mismas que son tan confiables como sencillas en su operación, basadas en la penetración de un cono que cae por su propio peso para penetrar en la muestra de suelo; dichas técnicas son el *cono sueco (60 g/60°)* y el *cono inglés (80 g/30°)*. Para el cono sueco, el límite líquido se define como el contenido de agua que tiene el suelo cuando la penetración del cono es de 10 mm; 20 mm en el caso del cono inglés.

En términos estadísticos se obtuvieron rectas de regresión para dos intervalos de $w_{L, \text{copa}}$; el primero de 30% a 350% y otro para 30% y 100%, que ligan los 9 valores de límites líquidos de ambos

conos con los correspondientes de la copa de Casagrande, usando para el secado tanto el HC como el HMO.

Aunque los límites líquidos se correlacionan linealmente, numéricamente son diferentes.

Cono sueco - copa de Casagrande

Las correlaciones entre el cono sueco y la copa de Casagrande, para el primer intervalo de $w_{L, \text{copa}}$ en ambos hornos [ecuación (6.1) y (6.3)], indican que cuando el valor de límite líquido con el cono sueco es menor a 46% sucede que $w_{L, \text{cono sueco}} > w_{L, \text{copa}}$, los coeficientes de correlación generalmente son mayores a 0.9869, señalando una fuerte correlación lineal. *Mendoza (1991b)* establece correlaciones similares con 19 datos de límites líquidos señalando que ambos conceptos son iguales para valores cercanos a 40% [ecuación (3.10) y (3.12) con coeficientes de correlación mayores a 0.9923].

Las correlaciones para el segundo intervalo [ecuaciones (6.2) y (6.4)] resultan ser diferentes a las del primero, la pendiente tiende a ser unitaria, indicando así una correlación tanto lineal como numérica de ambas definiciones del w_L . Los coeficientes r son mayores a 0.9823.

Cono inglés - copa de Casagrande

En el caso de las correlaciones entre cono inglés-copa de Casagrande, para el primer intervalo en ambos hornos, se tiene que el $w_{L, \text{cono inglés}} < w_{L, \text{copa}}$ para valores menores a 73% de $w_{L, \text{cono inglés}}$ [ecuación (6.5) y (6.7)] y ambas definiciones son similares cerca del valor antes mencionado. Los coeficientes de correlación son: 0.98937 y 0.9893 para el HC y HMO, respectivamente.

Las ecuaciones (6.6) y (6.8) establecidas para el segundo intervalo son similares entre sí; además de ser prácticamente iguales a las presentadas por otros investigadores (Tabla 3.4).

Cono sueco - cono inglés

Las correlaciones para los intervalos mencionados y en cada horno resultan ser lineales y prácticamente numéricamente iguales (inciso 6.4.1.3). Los coeficientes de correlación son siempre mayores a 0.9968.

La dispersión de los resultados entre las técnicas mixtas (cono-copa) es mayor en comparación a la obtenida entre ambos conos (comparando simplemente las figuras 6.4 a 6.7 con las correspondientes de 6.8 a 6.11 y todas éstas con las figuras 6.12 a 6.15). Los coeficientes r de las relaciones mixtas son generalmente mayores a 0.9893, en tanto que son mayores a 0.9968 para la relación entre conos.

Las correlaciones obtenidas en este estudio resultan similares a las formuladas por otros investigadores [(*Karlsson, 1981*), (*Mendoza, 1992*) y las presentadas en la Tabla 3.4] lo que

parece demostrar la validez y confiabilidad de estas técnicas.

La influencia del operador en el manejo de la copa de Casagrande es mayor que en la determinación del límite líquido con los conos penetrantes.

Para la arcilla de la Ciudad de México se obtuvo una correlación entre los valores de w_L de cono sueco y copa de Casagrande, para 33 muestras; ésta establece una relación lineal entre ambas definiciones de w_L , Fig 7.1, aunque sus valores no resultan iguales, esto cabe a que sus diferencias crezcan.

La ubicación de un suelo en la carta de plasticidad se realiza utilizando los valores del par coordinado (w_L, PI), la ecuación (7.2) denota la correspondencia entre el $w_{L\text{copa}}$ con su respectivo PI resultando similar a la presentada por *Marsal y Mazari (1969)* [ec (7.3)] y a la línea A de Casagrande. Si se utiliza el valor de $w_{L\text{cono sueco}}$ para ubicar las muestras en la carta, la ecuación de correlación resultante (7.5) es prácticamente paralela a la línea A. El efecto que implica utilizar el límite líquido de cono para clasificar al suelo es que disminuye el valor del PI, la utilización con cono no determina cambios importantes en la clasificación SUCS, ya que si bien disminuye el valor del PI también disminuye el del w_L , así es que se conserva su clasificación (Fig 7.3).

El límite líquido tradicional, obtenido con la copa ha sido útil para la clasificación de los suelos finos y la correlación con algunas propiedades mecánicas. Es posible inferir los anteriores valores cuando se use el cono por medio de las correlaciones expuestas en este trabajo.

Al conjuntar las técnicas alternativas, *cono sueco* y *cono inglés*, con el HMO se reduce el tiempo para la determinación del límite líquido a una hora de trabajo, lo que hace factible la implementación de ambas técnicas en los laboratorios de Mecánica de Suelos.

Se tiene que la penetración de cono en la masa del suelo, proporciona una medida de la resistencia al esfuerzo cortante no drenada (c_u) de los suelos finos blandos, ésta puede determinarse conociendo el valor de k_p , la profundidad de penetración d y, por supuesto, la masa del cono m .

La resistencia al esfuerzo cortante no drenada de los suelos remoldeados en su límite líquido es de 1.7 kPa. La correspondiente al usar la copa de Casagrande es de 2.5 Kpa.

Con el uso del cono es posible tener una medida de la sensibilidad de los suelos, al relacionar la c_u para las muestra inalteradas con la correspondiente a la muestra ya remoldeada, a igual contenido de agua.

REFERENCIAS

Antrim, J.D., Brown, F. B., Busching, H. W., Chisman, J. A., Moore, J. H., Rostron, J. P. and Schwartz, A. E. (1970), "*Rapid Test Methods for Field Control of Highway Construction*", Highway Research Board 103, pp. 1-62.

ASTM (1991), "*Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil, Rock, and Soil-Aggregate Mixtures*", Standar D2216-90, Vol. 04.08, Philadelphia, Pa.

ASTM (1991), "*Test Method for Water Content of Soil and Rock in Place by Nuclear Methods (Shallow Depth)*", Standard D3017-88, Vol. 04.08, Philadelphia, Pa.

ASTM (1991), "*Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*", Standard D4318-84, Vol. 04.08, Philadelphia, Pa.

ASTM (1991), "*Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Microwave Oven Method*", Standard D4643-87, Vol. 04.08, Philadelphia, Pa.

ASTM (1991), "*Test Method for Field Determination of Water (Moisture) Content of Soil by Calcium Carbide Gas Pressure Tester Method*", Standard D4944-89, Vol. 04.08, Philadelphia, Pa.

ASTM (1991), "*Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by Direct Heating Method*", Standard D4959-89, Vol. 04.08, Philadelphia, Pa.

Atterberg, A. (1911), "*On the Physical Testing of Soil and the Plasticity of Clays*", Int. Mitt. Bodenkunde, Vol 1.

Bjerrum, J. & Flodin, N. (1960), "*The Development of Soil Mechanics in Sweden*", Géotechnique 10, pp. 1-18.

Blume, J. (1974), *Métodos Estadísticos para Ingenieros*, Editorial Labor, Barcelona.

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), pp. 91-95.

Casagrande, A. (1932), "*Research on the Atterberg Limits of Soils*", Public Roads, 13(8), pp. 121-136.

Casagrande, A. (1958), "*Notes on the Desing of the Liquid Limit Device*", Géotechnique 8(2), pp. 84-91.

Charlie, W. A., Von Gunten, M. W. & Doehring, D. O. (1982), "*Temperature Controlled Microwave Drying of Soils*", Geotechnical Testing Journal, GTJODJ 5(3/4), pp. 68-75.

Ellstein, A. (1982), "*El Método del Tolueno Aplicado a la Medición Rápida del Contenido de Agua en Suelos*", Laboratorios Tlalli, S. A., México.

Grim, R. E. (1968), *Clay Mineralogy*, McGraw-Hill Book Co., New York.

Gilbert, P. A. (1974), "*Feasibility Study-Microwave Oven Used for Rapid Determination of Water Contents*", Evaluation of Soil Mechanics Laboratory Equipment, Report 13, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, Aug.

Gilbert, P. A. (1991), "*Rapid Water Content by Computer-Controlled Microwave Drying*", Journal of Geotechnical Engineering ASCE, 117(1), pp. 118-138.

Harison, J. A. (1988), "*Using the BS Cone Penetrometer for the Determination of the Plastic Limits of Soils*", Géotechnique 38(3), pp. 433-438.

Hansbo, S. (1957), "*A New Approach to the Determination of the Shear Strength of Clay by the Fall-cone Test*", Proceedings 14, SGI, Stockholm, pp. 7-47.

Hillel, D. (1971), *Soil and Water Physical Principles and Processes*, Academic Press, New York, USA, pp. 49-77.

Houlsby, G. T. (1982), "*Theoretical Analysis of the Fall Cone Test*", Géotechnique 32(2), pp. 111-118.

Karlsson, R. (1961), "*Suggested Improvements in the Liquid Limit Test, with Reference to Flow Properties of Remoulded Clays*", Proc. 5th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engng., Vol. 2, pp. 1041-1048.

Karlsson, R. & The Laboratory Committee of The Swedish Geotechnical Society, Laboratory Manual, Part 6 (1981), *Consistency Limits*, Swedish Council for Building Research, Stockholm.

Lade, P. V. & Nejadi-Babadai, H. (1976), "*Soil Drying by Microwave Oven*", Soil Specimen Preparation for Laboratory Testing, ASTM STP 599, pp. 320-340.

Lambe, T. W. (1949), "*How Dry is a 'Dry' Soil?*", *Proceedings*, Highway Research Board, Vol. 29, pp. 491-496.

Madinaveitia, M. y Mendoza, C. J. (1992), "*Estabilización de Tierras para Construcción de Viviendas*", Series del I de I-UNAM, No. ES-10, pp. 21-23.

Marsal, R. J. y Mazari, M. (1969), *El Subsuelo de la Ciudad de México*, Publicación de la UNAM.

Mendoza, M. J. (1991), "*Determinación del Contenido de Agua de Suelos con Secado en el Horno de Microondas y del Límite Líquido con el Cono Sueco*", Informe del I de I-UNAM.

Mendoza, M. J. (1991a), "*Determinación del Contenido de Agua de Suelos con Secado en el Horno de Microondas*", Memorias de la XV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Vol. 2, SMMS, San Luis Potosí, México.

Mendoza, M. J. (1991b), "*Determinación del Límite Líquido de Suelos con el Cono Sueco*", Memorias de la XV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Vol. 2, SMMS, San Luis Potosí, México.

Mendoza, M. J. (1991c), *Discussion to the "Rapid Water Content by Computer-Controlled Microwave Drying (Gilbert, 1991)"*, Journal of Geotechnical Engineering ASCE, 118(7), pp. 1129-1133.

Nagaraj, T. S. & Jayadeva, M. S. (1981), "*Re-examination of the One-Point Methods of Liquid Limit Determination*", Géotechnique 31(3), pp. 413-425.

Nagaraj, T. S., Murthy, B.R.S. & Binaumadhava (1987), "*Liquid Determination-Further Simplified*", Geotechnical Testing Journal, GTJODJ 10(3), pp. 142-145.

Ovando, E., (1992), "*Comunicación Personal*", I de I-UNAM.

Puschner, H. (1966), *Heating with Microwaves*, Philips Technical Library, Springer-Verlang, Inc., New York.

Saborío, U. J. y Zárate, A. M. (1964), "*Métodos de Control Rápido de la Compactación y la Humedad en Terraplenes*", Publicación de la Secretaría de Obras Públicas de México, México, D.F.

Sampson, L. R. & Netterberg, F. (1985), "*The Cone Penetration Index: A Simple New Soil Test to Replace the Plasticity Index*", Proc. 11th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engng., Vol. 2, pp. 1041-1048.

Scherrer, H. V. (1961), "*Determination of the Liquid Limite by Static Cone Penetration Test*", Proc. 5th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engng., Vol 1, pp. 171-184.

Sherwood, P. T. & Ryley, M. D. (1970), "*An Investigation of a Cone-penetrometer Method for the Determination of the Liquid Limit*", Géotechnique 20(2), pp. 203-208.

Sivapulliah, P. V. & Sridharan, A. (1985), "*Liquid Limit of Soil Mixture*", Geotechnical Testing Journal, GTJODJ 8(3), pp. 111-116.

Sowers, G. F., Vesic, A. & Grandolfi, M. (1959), "*Penetration Tests for Liquid Limit*", ASTM STP 254, pp. 216-224.

Wasti, Y. (1987), "*Liquid and Plastic Limits as Determined from the Fall Cone and the Casagrande Methods*", Geotechnical Testing Journal, GTJODJ 10(1), pp. 26-30.

Wood, D. M. (1982), "*Cone Penetrometer and Liquid Limit*", Géotechnique 32(2), pp. 152-157.

Wood, D. M. (1985), "*Some Fall-Cone Tests*", Géotechnique 35(1), pp. 64-68.

Wood, D. M. (1990), *Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics*, Cambridge University Press.

Zazueta, F. S. & Xin, J. (1992), "*Soil Moisture Sensors*", Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Document SS-AGE-27, June.