



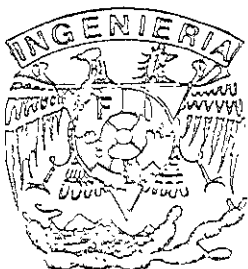
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

"USO DEL CONO INGLÉS Y LA COPA DE CASAGRANDE
PARA DETERMINAR EL LIMITE LÍQUIDO DE SUELOS FINOS.
ANÁLISIS COMPARATIVO".

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
FANNY BORJA DE LA PARRA

ASESOR: ING. HÉCTOR A. LEGORRETA CUEVAS.



MEXICO, D.F.

JULIO DE 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

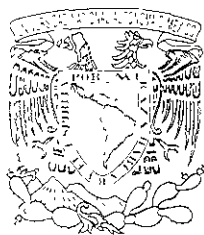


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta 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.



FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/090/01

Señorita
FANNY BORJA DE LA PARRA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. HÉCTOR A. LEGORRETA CUEVAS, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"USO DEL CONO INGLÉS Y LA COPA DE CASAGRANDE PARA DETERMINAR EL
LÍMITE LÍQUIDO DE SUELOS FINOS. ANÁLISIS COMPARATIVO"

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES
- II. MATERIALES ARCILLOSOS
- III. ESTRUCTURAS DE LOS MINERALES DE ARCILLA
- IV. LÍMITES DE CONSISTENCIA (ATTERBERG)
- V. PRUEBAS DE LABORATORIO
- VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS
- VII. CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFÍA

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 25 de mayo de 2001.
EL DIRECTOR

M. C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/GMP/mte.

*A mi madre por la ayuda
incondicional que me ha brindado
para alcanzar mis metas*

*A mi hermana Nancy por su
invaluable apoyo en el desarrollo de
mis estudios*

*A Nando por su apoyo y cariño en
todo momento*

*A mis amigos por estar siempre a
mi lado*

Agradecimientos

A la *Universidad Nacional Autónoma de México*, por la invaluable labor que realiza a favor del desarrollo del país.

Al Ingeniero *Héctor Alfredo Legorreta Cuevas*, por sus valiosos consejos para elaborar este trabajo, pero sobre todo, por ser un gran amigo.

Al Ingeniero *Arturo Tapia* por su ayuda en esta investigación y para mi ingreso al Posgrado.

A *Enrique* por su ayuda y asesoramiento en el Laboratorio de Mecánica de Suelos.

A *Nando, Carlos y Pino* por motivarme a seguir adelante.

A los *profesores Facultad de Ingeniería de la UNAM* por compartir sus conocimientos académicos.

Índice

Introducción	1
I Antecedentes	3
II Materiales Arcillosos	5
II.I Conceptos generales	5
II.II Ciclo de la arcilla	10
II.III Clasificación y nomenclatura de los minerales de arcilla	13
II.IV Interacción entre el agua y los minerales de arcilla	17
III Estructura de los Minerales de Arcilla	23
III.I Conceptos Generales	23
III.II Caolinita	24
III.III Halloysita	25
III.IV Montmorilonita	26
III.V Illita	27
III.VI Clorita	28
III.VII Vermiculita	29
III.VIII Otras	31
IV Límites de Consistencia (Atterberg)	32
IV.I Límite Líquido, Plástico y de Contracción	34
IV.II Métodos para determinar los Límites de Consistencia	42
IV.III Métodos de Secado	61
V Pruebas de Laboratorio y resultados obtenidos	67
V.I Descripción de las muestras utilizadas	67
V.II Pruebas de Laboratorio	72
V.III Resultados	73
VI Análisis de resultados	89
Conclusiones	94
Anexo	96
Bibliografía	111

Índice de Figuras

1.1	Depósitos arcillosos en México	3
1.2	Mapa de Durango	4
2.1	Clasificación de las arcillas por su capacidad de absorción	11
2.2	Ciclo de la Arcilla	13
2.3	Configuración del agua adsorbida	19
2.4	Arreglo de oxígenos e hidrógenos en la red del agua, propuesta por Hendricks y Jefferson	20
2.5	Configuración de la red de agua, propuesta por Hendricks y Jefferson	20
2.6	Superposición de la red de agua sobre capas de oxígeno de una vermiculita, propuesta por Hendricks & Jefferson	21
2.7	Superposición de la red de agua sobre capas de hidroxilos de dos capas de minerales de arcilla y la unión entre dos capas de agua e hidroxilos, propuesta por Hendricks y Jefferson	21
3.1	a) Unidad octaédrica de aluminio, magnesio, etc., b) Lámina octaédrica de aluminio, magnesio, etc.	23
3.2	a) Tetraedro de silicio, b) Lámina tetraédrica de silicio	23
3.3	Estructura de la caolinita, propuesto por Gruner	24
3.4	Estructura de la halloysita mostrando capas de agua, propuesto por Hendricks y Jefferson	25
3.5	Estructura de la montmorilonita, propuesta por Hofmann, Endell, Wilm, Marshall y Hendricks	26
3.6	Estructura de la clorita, propuesta por McMurphy	29
3.7	Estructura de la vermiculita mostrando capas de agua, propuesto por Hendricks y Jefferson	30
4.1	Estados de Consistencia de la Materia	34
4.2	Material en la copa mostrando las dimensiones de la ranura, y en la parte inferior la ranura cerrada debido a los golpes	35
4.3	Cono Inglés mostrando el disco medidor y su punta	38
4.4	Cono Inglés completo	38
4.5	Vástago y punta del Cono Inglés con vernier	38
4.6	Punta y pesas para el Cono Inglés con vernier	38
4.7	Recipiente cilíndrico para Cono Inglés con vernier, mostrando su diámetro	39
4.8	Recipiente cilíndrico para Cono Inglés con vernier, mostrando su altura	39
4.9	Disco medidor del Cono Inglés	40
4.10	Peso del vástago y punta del Cono Inglés	40
4.11	Peso de la punta del Cono Inglés	40
4.12	Dimensión del rollo para determinar el Límite Plástico	41
4.13	Copa de Casagrande acompañada del ranurador plástico y calibrador	43
4.14	Copa de Casagrande vista lateralmente	43
4.15	Copa de Casagrande, acercamiento de mecanismo de caída	43
4.16	Copa de Casagrande vista de frente con calibrador	43
4.17	Calibrador de la Copa de Casagrande con vernier	43
4.18	Ranuradores	44
4.19	Copa de Casagrande, a su máxima altura de caída	45
4.20	Copa de Casagrande, ajustada con el calibrador	45
4.21	Suelo con diferentes cantidades de agua	45

4.22	Copa de Casagrande, colocando material con espátula	46
4.23	Copa de Casagrande, con material aplicado	46
4.24	Copa de Casagrande, con material ranurado	46
4.25	Copa de Casagrande, con ranura cerrada	47
4.26	Copa de Casagrande, extrayendo material con espátula	47
4.27	Muestra de material colocado en vidrio de reloj	47
4.28	Muestra de material pesada	48
4.29	Cono Inglés con recipiente cilíndrico	49
4.30	Ápice tocando el ras del suelo	50
4.31	Ajuste a posición cero del disco medidor	50
4.32	Disparador accionado	50
4.33	Cono inglés con punta en la muestra	51
4.34	Punta en el material	51
4.35	Girando perilla	51
4.36	Girando perilla	51
4.37	Tomando lectura	51
4.38	Vista del Cono Inglés con lectura	52
4.39	Elevación de la punta del Cono Inglés	52
4.40	Sujetando recipiente cilíndrico para la extracción de muestra	53
4.41	Extrayendo muestra del recipiente cilíndrico	53
4.42	Haciendo rollo el material	54
4.43	Rollo quebradizo y agrietado	54
4.44	Parte del equipo para determinar Límite de Contracción	55
5.1	Materiales utilizados	67
5.2	Materiales utilizados	67

Índice de Cuadros

2.1	Clasificación de los Minerales de Arcilla	14
3.1	Fórmulas de algunos miembros del grupo de la montmorilonita, propuesto por Ross y Hendricks	27
4.1	Tabla comparativa de las principales características de los conos	41
4.2	Hoja de registro de datos de muestra 1	57
4.3	Límite de Contracción de muestra 1	58
4.4	Hoja de registro de datos de muestra 2	59
4.5	Límite de Contracción de muestra 2	60
5.1	Carta de Plasticidad de Suelos Finos	72
6	Clasificación de los Suelos Finos	89
6.1	Carta de Plasticidad de Suelos Finos	90
6.2	Gráfica Comparativa de Límite Líquido entre la Copa de Casagrande y el Cono Inglés	91
6.3	Gráfica Comparativa de Límite Líquido entre la Copa de Casagrande y el Cono Inglés	92
6.4	Gráfica Comparativa de Límite Líquido entre la Copa de Casagrande y el Cono Inglés	93

Introducción

El papel que juegan las arcillas en la Ingeniería Civil es muy importante, sobretodo en la Ciudad de México donde es necesario un estudio previo y definitivo al suelo donde se construirá, para conocer sus propiedades mecánicas e índices que son de gran importancia para decidir el procedimiento constructivo de cualquier obra civil.

Con el gran número de pruebas que se realizan se garantiza, bajo normas de control de calidad, que la obra sea segura debido a que en la Ingeniería y en especial en la Ingeniería Civil, están involucradas las vidas de muchas personas. Una aplicación en la Ingeniería Civil es en la construcción de pavimentos, donde se pueden utilizar arcillas que no presenten una expansión grande, y así en presencia de una precipitación pluvial la carpeta asfáltica permanecerá seca y sin deformaciones importantes.

Las arcillas desde el punto de vista geológico son minerales que se formaron hace varios miles o millones de años y que reúnen las características peculiares de composición y formación relacionadas con el curso de la evolución de la Tierra, para el artista constituyen los materiales plásticos o los pigmentos que le permiten expresar, mediante formas y composiciones de color, un estado de alma o de conciencia que puede ser bello.

Desde un punto de vista utilitario las arcillas han sido los materiales preferidos por el hombre para la manufactura de utensilios que sirven en la cocción y el consumo de sus alimentos, de vasijas de barro para almacenar y añejar el vino, de piezas finas de porcelana, así como pisos de mosaico y embaldosados.

La época moderna ha incorporado a las arcillas en numerosos productos de uso cotidiano a través de las nuevas tecnologías de modo que, aunque no lo percibamos, las arcillas forman parte importante de nuestras vidas. Un ejemplo son los nuevos materiales poliméricos que incluyen en su composición las arcillas minerales con el fin de lograr superficies suaves al tacto y propiedades mecánicas mejoradas, como en los juguetes, en las partes de automóvil y en otros componentes que son, además, resistentes a la flama y al desgaste. Algunos productos de alta tecnología incorporan a las arcillas en alta proporción, como los convertidores catalíticos que se utilizan en el control de emisiones contaminantes de los vehículos de motor, en el papel incombustible con que se provee a los astronautas desde el accidente del Challenger, el revestimiento de los transbordadores espaciales para soportar altas temperaturas a su regreso a la Tierra, o en las revistas de alta calidad.

Existen otras aplicaciones masivas de las arcillas minerales: los lodos para perforación de los pozos, los moldes de fundición y los catalizadores empleados en la refinación del petróleo.

No faltan las aplicaciones en el campo farmacéutico y en los productos de belleza, ya que las arcillas forman parte importante de los talcos desodorantes, jabones y cremas, pastas de dientes, etc.

Como podemos ver existen múltiples aplicaciones de las arcillas según sus características, el uso de la Copa de Casagrande y los Conos de Penetración nos ayudan en el estudio de un suelo para poder determinar su Límite Líquido, adicionalmente se obtiene el Límite Plástico para clasificar los suelos mediante el SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) con la ayuda de una Carta de Plasticidad de suelos finos.

Los objetivos de esta investigación es realizar un análisis comparativo entre la Copa de Casagrande y el Cono Inglés, porque cada método tiene diferentes criterios: la Copa de Casagrande trabaja con la resistencia al esfuerzo cortante del suelo, mientras el Cono Inglés trabaja con la resistencia normal del suelo y con los resultados obtenidos de ambos dispositivos servir como base informativa para el uso del Cono Inglés en el Laboratorio de Mecánica de Suelos, de la Facultad de Ingeniería (UNAM), como son las prácticas y otros proyectos obtenidos por convenio

Para cumplir con los objetivos que se plantean, se realizó una investigación en libros, artículos y revistas relacionados con las arcillas, límites de consistencia, aspectos técnicos de la Copa de Casagrande y Cono Inglés, así como normas para su construcción y uso

El contenido de la investigación se dividió en seis capítulos. El primer capítulo da una visión general sobre los principales yacimientos de arcilla en México; el capítulo dos muestra el comportamiento de las arcillas y su formación geológica; el capítulo tres expone la estructura química de los minerales de arcilla más importantes; el capítulo cuatro muestra la metodología para el cálculo de los límites de consistencia y métodos de secado, el capítulo cinco exhibe las pruebas de laboratorio realizadas y finalmente el capítulo seis proporciona las gráficas comparativas entre la Copa de Casagrande y Cono Inglés.

I Antecedentes

Formaciones Arcillosas en México

Los trabajos de investigación realizados por el Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de México (Salvador Enciso y otros) indican que el territorio nacional estuvo sujeto a una gran actividad volcánica durante los periodos Oligoceno-Mioceno, lo cual provocó la formación de enormes depósitos de rocas volcánicas que a su vez fueron alteradas y dieron origen a la mayor parte de las arcillas que encontramos en México. Estas son, por lo regular, del tipo montmorilonita y sus formaciones más abundantes se localizan al norte del país; en el Estado de Durango, están las de Cuencamé, Velardeña, Pedriceña, Rodeo y Nazas como las más conocidas y las que actualmente se encuentran en explotación

También existen depósitos importantes en Puebla, en los límites de Tlaxcala y Puebla (Chupaderos), Zacatecas, Oaxaca, Guanajuato (en Neutla), Veracruz (en Huayacocotla) y en numerosas formaciones menores localizadas en las antiguas zonas lacustres como la Cuenca de México (ver figura 1.1).



Figura 1.1 Depósitos arcillosos en México

Sin duda la zona localizada en Durango es la más extensa y se sabe ahora, gracias a los trabajos de Enciso y De Pablo que esas arcillas fueron originadas por la alteración de las rocas piroclásticas depositadas previamente en el valle por medio de una nube ardiente. La subsecuente alteración de tales rocas ígneas y la deposición del material alterado en suelo seco dio origen al mineral arcilloso más rico en potasio, como el de la zona de Vizcarra, mientras que el mineral depositado en la zona lacustre se alteró y produjo las arcillas color verde y rosa típicas de la región de Cuencamé. Estas formaciones se encuentran a una altura de 1 340 m sobre el nivel del mar, en el valle de Cuencamé La Lagunilla, que se extiende hasta Pedriceña y por el oeste hasta Rodeo y Nazas, donde la altura disminuye a 1128 m. Esta zona contiene los depósitos más importantes de México, que representan un gran potencial económico (ver figura 1.2).

Durango División Municipal



Figura 1.2 Mapa de Durango

II Materiales Arcillosos

II.1 Conceptos Generales

Historia del Concepto de Arcilla

Las arcillas han tenido una gran importancia desde la antigüedad en diversas áreas como son la industria cerámica, agricultura, geología, y otras. Muchas personas han estudiado los diversos materiales arcillosos, encontrando muchas propiedades en ellas. Las arcillas varían en sus propiedades, a pesar de que algunas de ellas tienen un color y una textura similar, por esta razón se ha estudiado la composición química de éstas. En un principio, se pensó que la fracción fina de los materiales arcillosos, era la esencia de la arcilla, encontrándose con diferentes cantidades de alúmina (óxido de aluminio), sílice, álcalis (sustancia que produce iones hidróxido, OH⁻, al disolverse en agua) y alcalinotérreos. En las arcillas de prácticamente la misma composición química se esperaba encontrar un comportamiento similar, y no en todos los casos fue así, ya que cambiaban las propiedades físicas, y en el caso de arcillas con comportamientos físicos similares se esperaba una composición química similar, no siendo siempre así.

Debido a lo anterior, se dedujo que debe existir variaciones no sólo en la composición química, sino también en la manera de combinarse sus elementos o en la manera en que se presentan en las arcillas. Fue entonces cuando se hizo una revisión de los estudios realizados sobre las arcillas para explicar sus variantes propiedades hasta llegar a la manera natural de combinarse la alúmina, el sílice, y sus otros componentes.

Durante muchos años no se tuvieron las herramientas necesarias para poder estudiar con profundidad la formación natural de las arcillas. Por tal motivo se hicieron suposiciones (que no siempre fueron certeras) para trabajar con éstas. En la actualidad el estudio de las arcillas está basado en las investigaciones y conceptos desarrollados por antiguos científicos, por lo cual es relevante mencionar algunos de ellos en este trabajo.

Una de las ideas más viejas era la existencia de una sustancia de arcilla pura que es el mineral caolinita o una sustancia similar a ésta, considerándola la esencia de las arcillas. De acuerdo a esto, las arcillas están formadas de caolinita y otros materiales considerados impurezas

Varias arcillas están compuestas en su mayoría de caolinita, y en algunas de éstas las partículas de caolinita son tan grandes que se pueden observar en un microscopio de baja resolución, aunque son pocos los casos. Con estos microscopios se pudo estudiar la formación natural años antes de la aparición de herramientas modernas (que han ayudado al estudio de las partículas pequeñas). Debido a la industria cerámica la caolinita fue y ha sido estudiada de manera importante. Actualmente se sabe que ésta no está presente en muchas arcillas. Los científicos Merrill¹ y Ries² encontraron que era un error considerar a la caolinita como base de todas las arcillas; aunque éste error se siguió cometiendo

¹ Merrill, G. P. "Non-metallic Minerals" Wiley, New York, (1904)

² Ries, H. "Clays and Clay Products in the United States" Wiley, New York, (1927)

Otro concepto difundido fue el considerar a todas las arcillas como un compuesto coloidal (coloide es una suspensión de partículas diminutas de una sustancia). Y se pensaba que toda la materia coloidal era amorfa. El compuesto coloidal de la arcilla fue aceptado como parcialmente orgánico e inorgánico cuando la arcilla contenía algo de materia orgánica.

En general hubo dos o tres ideas claramente definidas con respecto al compuesto coloidal de las arcillas. Van Bemmelen³ y Stremme⁴ definieron al compuesto coloidal como una mezcla de óxido de silicio, aluminio y hierro. Años después otros científicos mostraron que este coloide no tenía óxidos. Posteriormente otros científicos consideraron que éste coloide tendría sales débiles de hierro, aluminio y silicio. Algunas veces estos compuestos fueron definidos como amorfos, pero no con una estructura coloidal real.

Más tarde se encontró que el intercambio en estas estructuras eran los hidróxidos de aluminio silicatados. Otros investigadores dividieron la fracción coloidal en dos partes, la primera que fue soluble al ácido clorhídrico, se le llamó alofaneton, y a la segunda no soluble al ácido clorhídrico, pero soluble en una solución caliente de ácido sulfúrico y se le nombró caolinton. El alofaneton fue considerado como un coloide de composición variable y responsable en mayor parte de las propiedades plásticas y adsorcivas de las arcillas (la adsorción es la adhesión de moléculas de gases o líquidos a la superficie de sólidos porosos), en cambio el caolinton se consideró amorfo pero con contenido de materia cristalina. Con esto se mostraron ligeras variaciones sobre el mineral caolinita. Se hicieron varios intentos para clasificar los materiales arcillosos con base en el caolinton y el alofaneton.

Algunos investigadores también desarrollaron esta idea pero una de las sustancias fue nombrada clayita, sustancia amorfa, con la misma composición química que el mineral caolinita, la cual era considerada como la verdadera esencia de la sustancia que forma a los caolines. Pero la otra sustancia, pelinita, fue la verdadera esencia de los materiales arcillosos. Tiempo después la pelinita se pensó como un cuerpo amorfo de composición variable, pero generalmente con un mayor contenido de sílice que la clayita, y con una cantidad apreciable de álcalis y/o alcalinotérreos.

El investigador Wiegner⁵ estudió ampliamente el intercambio catiónico de las moléculas de arcilla, dividiéndolo en tres partes: 1) un kernel, 2) una capa externa que adsorbe aniones a el kernel pero estando en contacto con el, 3) intercambio catiónico atraído a la partícula por la absorción de aniones. El kernel fue considerado principalmente como un compuesto de hidróxido de aluminio y silicio de composición variable y con atributos estructurales desconocidos.

En otros estudios del intercambio catiónico en los suelos, se observó la arcilla como un material zeolítico, no en el sentido mineralógico, sino que el material tenía las propiedades de las zeolitas, pero no igual estructura química. En estos estudios no se determinó la naturaleza de dicha estructura.

Mattson^{6, 7}, hizo una ligera variación de este concepto diciendo que la estructura coloidal era relativamente inerte y compuesta por silicio, hierro y aluminio, con álcalis y

Van Bemmelen, J. M. Die Absorptionverbindung und das Absorptionvermogens der Ackererde, *Landw. Vers. Sta.* 69-136 (1883)

Stremme, H. On A. leslane, Halloysite and Montmorillonite, *Centr. Mineral. Geol.* pp 205-211 (1911)

Wiegner, G. Ionenaustausch und Struktur, *Trans. Intern. Congr. Soil Sci. 3rd Congr., Oxford*, 5-28 (1936)

Mattson, S. The Law of Soil Colloidal Behavior. III. Isoelectric Precipitates, *Soil Sci.* 459-495 (1930)

alcalinotérreos. Con los avances en la mineralogía de la arcilla, Mattson modificó su concepto y postuló el complejo coloidal como un kernel cristalino cubierto de una capa heterogénea y amorfa a la cual le falta una composición definida y que no es igual al núcleo. De acuerdo con él, el análisis de difracción de rayos X reveló sólo el carácter cristalino del núcleo y no su capa heterogénea, la cual es la esencia del complejo.

Hace tiempo se había considerado que la composición de los suelos eran cantidades variables de compuestos de hierro, aluminio y silicio principalmente, pero todos los suelos tenían la misma estructura. De acuerdo a este concepto, aunque los suelos fueran de diferentes lugares y se expusieran a un tratamiento de ácidos débiles, la estructura restante tiene un comportamiento exactamente igual. Pero los estudios de la mineralogía de la arcilla han mostrado que son importantes y significativas las diferencias en la estructura de la fracción fina del suelo

Asch⁸, Byers⁹ y otros investigadores, consideraron que el componente esencial del suelo era el número de sustancias en vez de un solo compuesto. Ellos vieron estas sustancias como ácidos o bases de aluminio o silicio con una composición y estructura definida. Este concepto se aproxima al concepto actual del mineral arcilla y, de hecho Byers y otros investigadores sugirieron nombres para los minerales de arcilla, por ejemplo, montmorilonita, halloysita, caolinita, etc.

Ha tomado mucho tiempo conocer que los minerales de la zeolita (escolecita, laumontita, heulandita, por ejemplo) son compuestos que tienen la propiedad de intercambio catiónico. Way¹⁰ y sus sucesores demostraron que los suelos tienen la capacidad de el intercambio catiónico debido al contenido de silicio en ellos. Tiempo después, la idea general de que el complejo coloidal era amorfo (por lo tanto un compuesto zeolítico), fue apoyada de manera importante. A pesar del apoyo a esta idea, también se tuvo tenido un gran apoyo el trabajo mostrado por Gedroiz¹¹ y otros, marcando las diferencias entre las propiedades de las zeolitas, la parte fina de los materiales arcillosos, y analizando el intercambio catiónico. Los análisis modernos con rayos X han revelado en algunos casos, que las zeolitas forman parte de materiales arcillosos aunque no son componentes significativos

De acuerdo con Oden¹², las arcillas están compuestas en un arreglo heterogéneo de partículas cristalinas muy pequeñas y componentes amorfos. Generalmente las arcillas de origen glacial pueden contener una gran variedad de minerales en partículas muy pequeñas. La forma de las partículas, su adsorción, sus propiedades superficiales y su pequeño tamaño, es indispensable para saber si el material es una arcilla

Le Châtelier¹³ y Lowenstein¹⁴ también afirmaron que los materiales arcillosos están compuestos de partículas muy pequeñas de minerales cristalinos. Otros investigadores

⁸ Mattson, S. The Laws of Soil Colloidal Behavior, IX, Amphoteric Reactions and Isoelectric Weathering, *Soil Sci.*, 209-239 (1932)

⁹ Asch, W., & D. Asch, "The Silicates of Chemistry and Commerce", Constable, London (1914)

¹⁰ Byers, H. G., L. T. Alexander, & R. S. Holmes, The Composition and Constitution of the Colloids of Certain of the Great Soil Groups. *U. S. Dept. Agr. Tech. Bull.* 484 (1935)

¹¹ Way, J. T. On the Power of Soils to Absorb Manure, *J. Roy. Agr. Soc. (Engl.)* 123-143 (1852)

¹² Gedroiz, K. K. Die Lehre vom Adsorptionvermögens der Bodens, *Kolloidchem. Beihefte*, 317-448 (1931). Translated by H. Kuroki

¹³ Oden, S. General Introduction to the Chemistry and Physical Chemistry of Clays, *Bull. Geol. Inst. Univ. Upsala*, pp. 175-217 (1913)

¹⁴ Lowenstein, J. Die Verwitterungselementarformen des Bodens, *Monatsh. Naturg.* 204-211 (1887)

con análisis de difracción de rayos X encontraron en la materia cristalina partículas muy finas pero no encontraron el arreglo heterogéneo.

Ross y sus colegas^{15 16} estudiaron la composición de las arcillas utilizando el microscopio petrográfico, sugiriendo una clasificación de las arcillas. En 1930 y 1931 Marshall^{17 18}, empezó a estudiar las características ópticas de suspensiones (estado de un cuerpo dividido en partículas muy finas y mezclado con un fluido sin disolverse en él) de arcilla cuando se sometían a un campo eléctrico. Él observó la orientación de la fracción fina de las arcillas bajo el campo eléctrico.

De acuerdo con el concepto arcilla, éstas están formadas por partículas cristalinas muy pequeñas de uno o más miembros de un grupo pequeño de minerales conocido como los minerales de arcilla. Los minerales de arcilla son principalmente silicoaluminatos hidratados con magnesio o hierro que sustituye totalmente o parcialmente al aluminio en algunos minerales, con álcalis o alcalinotérreos. Algunas arcillas están compuestas por un solo mineral de arcilla, pero la mayoría son una mezcla de minerales de arcilla. Además los materiales arcillosos contienen minerales no arcillosos (en diversas cantidades), como es el cuarzo, la calcita, el feldespato y la pirita, siendo los principales ejemplos. También se encuentra materia orgánica en muchas de las arcillas.

Los cristales de los minerales de arcilla son el constituyente principal de casi todas las arcillas, es por esto que son los componentes más importantes para la determinación de sus propiedades, aunque los minerales no arcillosos y otros factores pueden influir en las propiedades de éstas, si están presentes de manera apreciable.

Retomando las ideas expuestas por varios investigadores años antes, la arcilla era un cuerpo amorfo; pero con el avance tecnológico se encontró que no siempre la arcilla se presenta como un cuerpo amorfo, por lo tanto, esta característica no puede ser considerada como la responsable de las propiedades de las arcillas.

Desde 1930 y con la aceptación general del concepto mineral de arcilla se ha incrementado el interés de estudiar los materiales arcillosos. En diversas áreas como son mineralogía, geología, química, física, agronomía entre otros se han aprovechado las investigaciones sobre los materiales arcillosos. Algunos de los investigadores que han contribuido al desarrollo de este concepto son:

- Ross & Kerr^{19 20} trabajaron con la caolinita y la halloysita.
- Ross y Hendricks²¹ trabajaron con la montmorillonita dando información muy importante sobre sus propiedades.
- Hendricks^{22 23 24 25 26 27} contribuyendo con sobresalientes escritos sobre las propiedades físicas de los materiales arcillosos, estructura química, intercambio

¹⁵ Lowenstein, E., Ueber Hydrate deren Dampfspannung sich kontinuierlich mit der Zusammensetzung ändert, *Z. anorg. Chem.*, 69-139 (1909)

¹⁶ Ross, C. S., & E. V. Shannon, The Chemical Composition and Optical Properties of Beidellite, *J. Wash. Acad. Sci.*, 467-468 (1925)

¹⁷ Ross, C. S., & E. V. Shannon, Minerals of Bentonite and Related Clays, and Their Physical Properties, *J. Am. Ceram. Soc.* 77-96 (1926)

¹⁸ Marshall C. E., The Orientation of Anisotropic Particles in an Electric Field, *Trans. Faraday Soc.*, 173-189 (1930)

¹⁹ Marshall C. E., Clays as Minerals and Colloids, *Trans. Ceram. Soc. (Engl.)*, 81-96 (1931)

²⁰ Ross, C. S., & P. F. Kerr, The Kaolin Minerals, *U. S. Geol. Survey Profess. Paper* 165E, pp. 151-175 (1931)

²¹ Ross, C. S. & P. F. Kerr, Halloysite and Allophane, *U. S. Geol. Survey, Profess. Paper* 185G, pp. 135-148 (1934)

²² Ross, C. S., & S. B. Hendricks, Minerals of the Montmorillonite Group, *U. S. Geol. Survey Profess. Paper* 205B, pp. 23-79 (1933)

catiónico, reacción de iones orgánicos y los minerales arcillosos, la hidratación de las arcillas y la adsorción de agua del mineral arcilla.

- o Jenny²⁸ contribuyó con conceptos del intercambio catiónico.
- o Barshad²⁹ publicó sobre la vermiculita y clorita.
- o Grim, Bradley y otros^{30 31 32} trabajaron sobre la illita.
- o Bradley^{33 34} de manera independiente estudió la atapulgita y la unión de las moléculas en los minerales arcillosos.
- o Pauling³⁵ en el estudio de los silicatos apoyó a la elaboración de la estructura de los minerales de arcilla.
- o Gruner^{36 37} trabajó en la estructura de la caolinita y la vermiculita.
- o Giesecking³⁸ ayudó al aumento del conocimiento en la adsorción de los iones orgánicos y la estructura de la montmorillonita.
- o Hofmann, Endell y Wilm³⁹ de la Escuela Superior Técnica en Berlín, trabajaron en la estructura de la montmorillonita, siendo la más aceptada.
- o Mehmel⁴⁰ y su grupo de trabajo estudiaron a la halloysita ampliamente, y los índices de refracción de algunos minerales de arcilla que pueden variar dependiendo de la cantidad de agua que contengan.
- o Correns⁴¹ estudió muestras de arcilla del fondo marino.
- o Noll⁴² trabajó en la síntesis de los minerales de arcilla.
- o Caillere⁴³ contribuyó con el estudio de la sepiolita y palygorskita (minerales de arcilla).
- o Glaesser y Mering^{44 45} contribuyeron en el estudio del fenómeno de adsorción en los minerales de arcilla y su textura, apoyándose en un microscopio electrónico.
- o MacEwan⁴⁶ hizo un estudio detallado de la reacción de los minerales de arcilla y sus componentes orgánicos.

²² Hendricks, S B, On the Structure of the Dickite, Halloysite and Hydrated Halloysite, *Am. Mineral*, 275-300 (1938)

²³ Hendricks, S B., Polymorphism of the Micas with Optical Measurements by M. E. Jefferson, *Am Mineral*, 729-771 (1939).

²⁴ Hendricks, S B, Lattice Structure of Clay Minerals and Some Properties of Clays, *J. Geol.*, 276-290 (1942).

²⁵ Hendricks, S B, Base-Exchange in the Crystalline Silicates, *Indeng. Chem*, 625-630 (1945)

²⁶ Hendricks, S B, R A Nelson and L T Alexander, Hydration Mechanism of the Clay Mineral Montmorillonite Saturated with Various Cations, *H Am Chem. Soc.*, 1457-1465 (1936).

²⁷ Hendricks, S B, & M E Jefferson, Structures of Kaolin and Talc-Pyrophyllite Hydrates and Their Bearing on Water Sorption of the Clays, *Am Mineral* 863-875 (1938)

²⁸ Jenny, H, Studies of the Mechanism of Ionic Exchange in Colloidal Aluminum Silicates, *J Phys. Chem*, 2217-2258 (1932)

²⁹ Barschad, I, The Effect of Interlayer Cations on the Expansion of the Mica Type of Crystal Lattice, *Am Mineral*, 275-238 (1950)

³⁰ Grim, R E, R H Bray, & W F Bradley, The Mica in Argillaceous Sediments, *Am. Mineral.*, 813-829 (1937)

³¹ Grim, R E, Relation of the Composition to the Properties of Clays, *J Am Ceram Soc.*, 141-151 (1939).

³² Grim, R E, & F L Cuthbert, The Bonding Action of Clays, *Illinois State Geol. Survey Repts. Invest.* 110 (1946).

³³ Bradley, W F, The Structural Scheme of Atapulgite, *Am. Mineral.*, 405-410 (1940)

³⁴ Bradley, W F, Molecular Associations between montmorillonite and Some Polyfunctional Organic Liquids, *J Am Chem Soc.*, 975-981 (1945)

³⁵ Pauling, L, The Structure of Micas and Related Minerals, *Proc Natl. Acad Sci U S*, 123-129 (1930).

³⁶ Gruner, J W, The Crystal Structure of Kaolinite, *Z. Krist.*, 75-88 (1932)

³⁷ Gruner, J W, The Structure of Vermiculite and Their Collapse by Dehydration, *Am Mineral.*, 557-574 (1934).

³⁸ Giesecking, J E, Mechanism of Cation Exchange in the Montmorillonite-Beidellite-Nontronite Type of Clay Mineral, *Soil Sci.*, 1-14 (1939)

³⁹ Hoffman, U, K Endell, & D Wilm, Kristallstruktur und Quellung von Montmorillonit, *Z. Krist.*, 340-348 (1933)

⁴⁰ Mehmel, M, Ueber die Struktur von Halloysit und Metahalloysit, *Z. Krist.*, 35-43 (1935)

⁴¹ Correns, C W, et al, Die Sedimente des äquatorialen atlantischen Ozeans, Deutsche atlantische Exped. *Meteor* 1925-1927 *Wiss. Ergob.*, Teil 3 (1937)

⁴² Noll, W, Mineralbildung im System Al₂O₃-SiO₂-H₂O, *Neues Jahrb. Mineral. Geol. Beilage Bd. A*, 65-115 (1935)

⁴³ Caillere, S, Observation sur les compositions chimiques des palygorskites, *Compt. rend.*, 1795-1798 (1934)

⁴⁴ Glaesser, R, On the Mechanism of Formation of Montmorillonite-Acetone Complexes, *Compt. rend.*, 935-938 (1950)

⁴⁵ Mering, J, A Mathieu-Sicaud, & I Perrin-Bonnet, Observation au microscope électronique de montmorillonite saturée par des cations, *Trans. Faraday Soc.*, 29-32 (1950)

⁴⁶ MacEwan, D, Molecular Complexes of Clays with Organic Compounds, *Trans. Faraday Soc.*, 349-367

Propiedades de la Arcilla

Las principales características de la mineralogía de las arcillas es su pequeño diámetro, que es menor de 2 μm , y su comportamiento cristalino. Estos dos factores provocan que las arcillas tengan una superficie larga y que por consecuencia tengan propiedades de adsorción de agua, comunes a todos los materiales de partículas finas. La superficie atrae agua a la estructura del mineral y ésta se adsorbe en sus capas, que pueden ser hasta cuatro. Dichas capas están en una estructura no definida, y el agua no abandona la superficie fácilmente.

Las arcillas entonces atraen el agua hacia su superficie. Esta atracción crea una acumulación de agua en su interior. El agua absorbida por las arcillas proporciona una gran tendencia a permanecer en suspensión en medios acuosos y así las arcillas son fácilmente transportadas en estado de suspensión.

Todas las arcillas atraen el agua a sus superficies (adsorción), pero algunas de ellas atraen agua a su interior (absorción). La absorción es la incorporación de moléculas dentro de la partícula cristalina mientras que la adsorción es la adición de moléculas sobre la superficie de la partícula. Las sepiolitas-palygorskitas tienen canales en los cuales existe agua que es fácil de extraer por medio de calor, ésta es llamada agua zeolítica. Las esmectitas (grupo de las montmorilonitas) guardan agua entre sus capas, logrando que cambie su volumen notablemente. Esta propiedad de expansión es muy notable en su composición natural.

II.11 Ciclo de la arcilla

Las arcillas son una parte muy importante para el medio ambiente geológico, así como en la vida diaria del ser humano. Estas nacen y desaparecen en un ciclo, que a continuación será descrito.

El origen de las grandes cantidades de material arcilloso se da por el proceso de intemperización al aire libre y bajo el agua, logrando una sedimentación, al presentarse este fenómeno se recombinan los elementos químicos, dando como resultado nuevos tipos de arcillas. Algunas arcillas se producen por procesos hidrotermales (una interacción de agua-roca a una temperatura de 100 a 250°C). La alteración provocada por los procesos hidrotermales produce una gran cantidad de arcillas de alta calidad utilizadas en los procesos industriales.

La mutación o transformación de las arcillas de una intemperización, pasan a una trasportación fluvial y éstas se sedimentan en cuencas donde se sepultan, siendo este proceso el ciclo de las arcillas en una forma general. Las arcillas reaccionan a procesos químicos y térmicos, cambiando sus propiedades (ver figura 2 1).

Clasificación de las arcillas por su capacidad de absorción

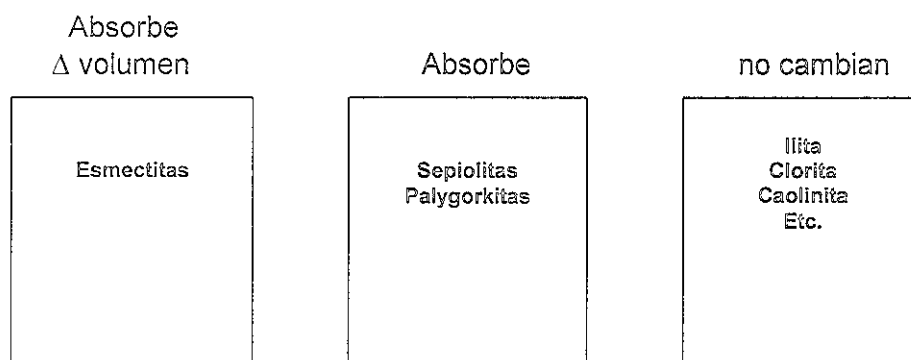


Figura 2.1 Las familias de los materiales arcillosos se clasifican de acuerdo a sus características de absorción. Las esmectitas son arcillas expansivas, dicha expansión es provocada por la absorción de agua que incrementa su volumen. Las sepiolitas-palygorskitas no se expanden a pesar de su gran capacidad de absorción. Otros minerales arcillosos no tienen estas características.

Intemperización

En la interfase tierra-roca, los minerales de silicio a altas temperaturas comienzan a ser inestables, debido a su cambio químico en el ambiente. Las nuevas condiciones químicas están controladas por el estado líquido, la relación entre agua y roca es muy grande y por lo tanto, la tendencia a la hidratación a altas temperaturas de los minerales de silicio. A partir de esta hidratación se obtiene una nueva estructura mineral que contiene agua cristalina, que es la unión de OH (hidróxido) en el interior de mineral.

Las esmectitas y sepiolitas-palygorskitas también presentan una absorción molecular de agua muy débil. Por lo tanto el proceso de hidrólisis⁴⁷ que ocurre durante la intemperización involucra dos tipos de hidrógenos, OH o H₂O.

Aunque una gran cantidad de arcillas se producen por intemperización, el efecto más grande durante este proceso es la disolución (descomposición de los cuerpos por la acción de un agente que se une íntimamente a ellos). Gran cantidad de minerales en las rocas son totalmente disueltos por el agua de lluvia y son transportados a las cuencas de los lagos o a los océanos. Sólo una porción de minerales de silicio en las rocas son disueltos de manera incongruente (por ejemplo, el cambio de la fase mineral en otra fase mineral, es decir, la recombinación de los elementos en una solución acuosa), dejando atrás minerales de arcilla y óxidos principalmente. Las arcillas formadas en el proceso de intemperización son el resultado de una solución incongruente de los silicatos, los cuales se formaron en condiciones de alta temperatura y presión.

⁴⁷ Hidrólisis, tipo de reacción química en la que la molécula de agua, con fórmula H₂O, reacciona con una molécula de una sustancia AB en la que A y B representan átomos o grupos de átomos. En la reacción, la molécula de agua se descompone en los fragmentos H y OH y la molécula AB se descompone en A' y B'. A continuación, estos fragmentos se unen formando los productos finales AOH y HB. A este tipo de reacción se le conoce comúnmente como doble desplazamiento de iones.

Las arcillas que se forman en este proceso son a veces llevadas por el agua de lluvia a través de un proceso de erosión. La trasportación de las arcillas es fácil, ya que son pequeñas partículas que tienen la capacidad de formar parte de la solución acuosa. Y por esto es que se pueden trasportar grandes distancias.

Sedimentación

La sedimentación de las arcillas ocurre en su mayoría en los lagos u océanos. En estos ambientes se producen cambios en la mineralogía de la arcilla debido al contacto con el agua, esto ocurre después de su depositación.

Los elementos químicos de los sedimentos en la solución tienen diferentes potenciales químicos que los elementos formadores de las arcillas. El tiempo de residencia de las arcillas en el ambiente de sedimentación es mayor que en el proceso de intemperismo. Por esto las arcillas tienen tiempo de reaccionar en la solución en la que se encuentran y llegar a un equilibrio químico.

Varios tipos de minerales de arcilla pueden tener un origen único en el ambiente sedimentario. Los minerales nuevos formados por este proceso pueden ser afectados de manera importante por la oxidación (oxidación de un cuerpo corresponde a una pérdida de electrones) de su ambiente. También es importante la cantidad de materia orgánica presente en ellas, ya que ésta controla el estado de oxidación de los silicatos.

También los organismos que viven en este ambiente, mediante la acción microbial, cambian el estado de oxidación de hierro, o pueden estabilizar los sulfitos en vez de los sulfatos.

La interacción de las rocas ígneas con el agua de mar en el piso oceánico se ve afectada por la litificación o diagénesis⁴⁶, produciendo arcillas marinas.

Metamorfismo

Si la sepultación se realiza en condiciones de alta temperatura, produce la recristalización de los minerales de arcilla, entonces ocurre el proceso de metamorfismo. Este describe condiciones termodinámicas, las cuales afectan la composición química de las arcillas

Alteración Hidrotermal

Este proceso no es muy frecuente, pero es importante ya que produce la alteración de las rocas en grandes cantidades debido al agua caliente. Éste es un tipo de intemperismo que sucede con agua a temperatura superior a 50 °C, y generalmente forma depósitos de

⁴⁶ **Diagénesis**: cambios físicos y químicos que afectan a un sedimento una vez depositado y que se producen a temperaturas y presiones relativamente bajas, el conjunto de alteraciones que ocurren a temperaturas y presiones elevadas se llama metamorfismo. Convencionalmente se ha establecido que los cambios diagenéticos son los que tienen lugar a temperaturas inferiores a 300 °C y presiones de menos de 100 a 200 millones de pascales (Pa) o newtons por metro cuadrado (N/m²). Pero en la práctica es difícil precisar tanto, y los límites entre diagénesis y metamorfismo son muy difusos, como se puede apreciar en la frontera su confunde con el inferior del otro.

menas (mineral a partir del cual se extrae un metal, tal como se encuentra en el yacimiento) y minerales de arcillas.

Una vez analizado cada proceso que interviene en el ciclo de las arcillas, se puede hacer mención a éste de la siguiente manera (ver figura 2.2).

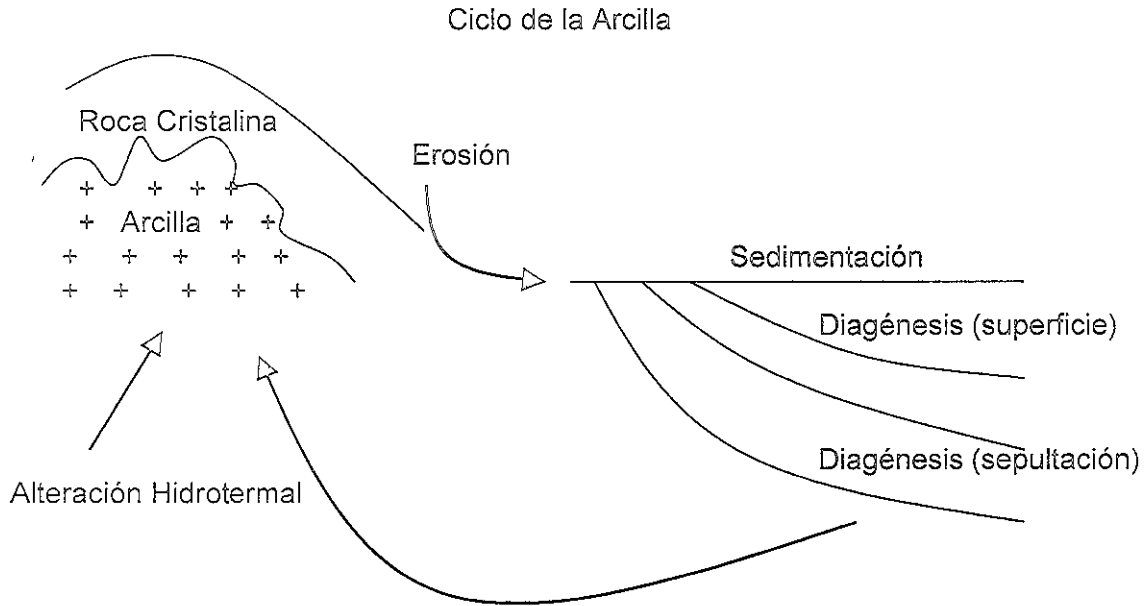


Figura 2.2 El ciclo de la arcilla es ilustrado desde el estado sólido y su erosión, sedimentación después de la trasportación fluvial, sepultación y diagénesis, y metamorfismo que es el proceso que trasforma a las arcillas en micas y otros minerales no arcillosos. El metamorfismo de la roca puede elevar rocas hacia la superficie en forma de arcillas sólidas, así dando inicio a otro ciclo de arcillas. La alteración hidrotermal forma arcillas en rocas cristalinas por la interacción de soluciones químicas agresivas las cuales trasforman de viejos minerales a arcillas. La transformación hidrotermal y el intemperismo son similares en naturaleza pero difieren en su régimen de temperatura.

II.III Clasificación y nomenclatura de los minerales de arcilla

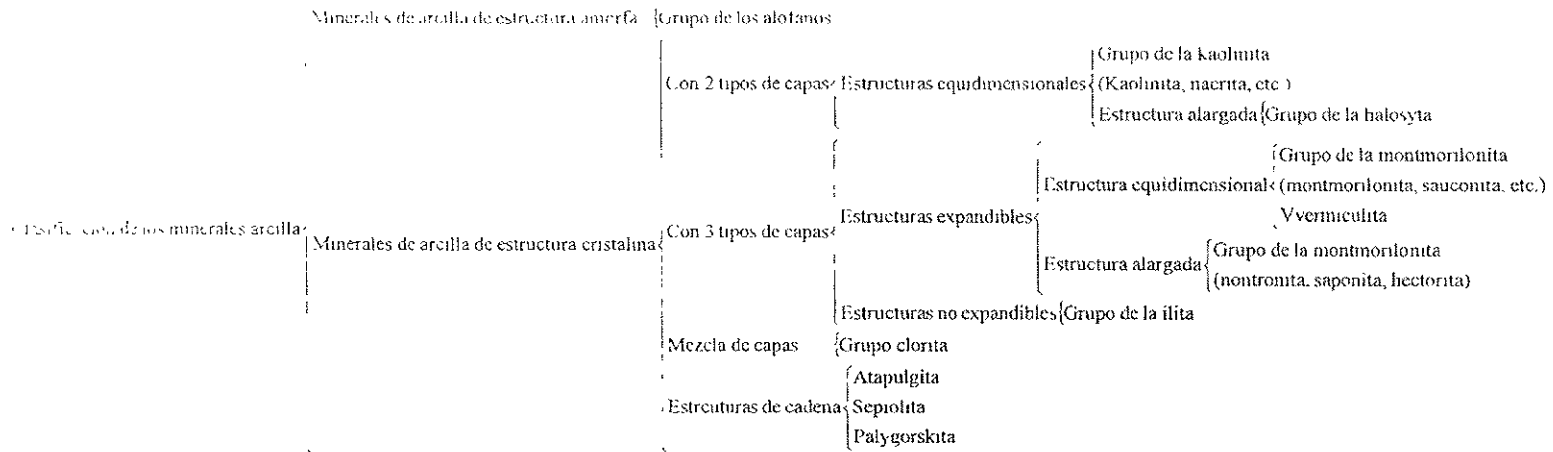
La clasificación que va a ser expuesta en este trabajo está basada en atributos estructurales de los minerales de arcilla (Cuadro 2.1). Los minerales de arcilla se dividen de manera muy general en amorfos y cristalinos, siendo los más importantes los cristalinos.

El nombre de alófono en alusión a su cambio frecuente de material vítreo a uno con apariencia térrea, fue dado al constituyente de los minerales amorfos de arcilla. Ross y Kerr⁴⁹ mostraron que no todas las arcillas tenían una estructura amorfa, sino que también existían algunas con composición cristalina, apoyándose en análisis de difracción de rayos X.

Como anteriormente se comentó en III la palabra alofanelon se usó para nombrar a la parte de la arcilla soluble al ácido clorhídrico, y también fue pensado que éste era amorfo

⁴⁹ R. W. Ross and J. M. Kerr. The Kainite Minerals. U. S. Geol. Survey Profess. Paper 135E, pp. 151-175 (1931)

Cuadro 2.1 Clasificación de los Minerales de Arcilla



- Con 2 tipos de capas (estructuras laminares compuestas de una capa de tetraedro de silicio y una capa octaédrica de aluminio)
- Con 3 tipos de capas (estructuras laminares compuestas de 2 capas de tetraedros de silicio y una capa dioctaédrica central o trioctaédrica)
- Mezcla de Capas (apilación de capas de diferentes tipos alternadas)
- Estructuras de cadena (como tetraedros de silicio de la cadena de la hornblenda unidos con átomos de hidrógeno e hidróxidos de aluminio y magnesio)

Fuente: Adaptado de Grim (1968)

Pero, por ejemplo la montmorilonita es soluble a este ácido y ésta tiene una estructura cristalina; por esta razón el término alofaneton está en decadencia.

Ross y Kerr discutieron la nomenclatura de los minerales de caolín y su uso ha sido en general muy aceptado. De acuerdo con ellos, el caolín está esencialmente compuesto por material arcilloso que es bajo en hierro, y usualmente de color blanco o casi blanco, es un silicoaluminato hidratado con una composición aproximada a $2\text{H}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ y si contiene algo más, eso es considerado impureza. Ellos encontraron tres tipos de caolines, que son: la caolinita, la nacrita y la dickita.

El nombre de halloysita lo dio Berthier⁵⁰ en 1826 para el material que encontró en una mina de zinc y hierro en Bélgica; en honor a Omalius d'Halloy quien estudió el mineral años antes. Ross y Kerr⁵¹ estudiaron mucho este material con métodos más modernos y encontraron que la halloysita tiene una estructura cristalina y muy parecida a la caolinita. Actualmente es aceptada la halloysita como un mineral diferente a la caolinita.

Ross y Kerr encontraron también dos tipos de halloysita, una usualmente de color blanco o de color claro, porosa, friable (que se desmenuza fácilmente) y con una textura cercana al algodón; mientras que la segunda es densa, no porosa y con una apariencia de porcelana.

Damour y Salvétat⁵² propusieron el nombre de montmorilonita en 1847 para el mineral encontrado en Montmorillon, Francia, el cual es silicoaluminato hidratado.

Ross y sus colegas publicaron de 1926⁵³ a 1945⁵⁴ estudios sobre la identificación de las montmorilonitas formando el grupo de éstas dentro de los minerales de arcilla. Ellos indican en estos estudios la variación en la composición de los miembros de este grupo.

En 1933 Hofmann, Endell y Wilm⁵⁵ publicaron la estructura de la montmorilonita mostrando su estructura expansible y sus propiedades.

Cronstedt⁵⁶ en 1788 describió un material que nombró como esmectita y formó su grupo, el cual al parecer era el mismo que la montmorilonita. Pero Kerr⁵⁷ mostró que los minerales descritos en el grupo de las esmectitas eran montmorilonitas. Aunque el nombre de la esmectita fue primero, es más usado en la actualidad montmorilonita.

El nombre de la saponita fue dado por Svanberg en 1840⁵⁸, y en 1842⁵⁹ publicó el análisis de muchos otros minerales de arcilla. Ross y Kerr⁶⁰ en 1931 identificaron a la saponita como miembro del grupo de la montmorilonita por su alto contenido de MgO (óxido de magnesio (II))

⁵⁰ Berthier, P., Analyse de l'halloysite, *Ann chim. et phys.*, 332-335 (1826)

⁵¹ Ross, C. S. & P. F. Kerr, Halloysite and Allophane, *U. S. Geol. Survey, Profess. Paper* 185G, pp. 135-148 (1934)

⁵² Damour, A. A., & D. Salvétat, Et analyses sur un hydrosilicate d'alumine trouvé a Montmorillon, *Ann chim. et phys.*, sér 376-383 (1847)

⁵³ Ross, C. S., & E. V. Shannon, Minerals of Bentonite and Related Clays and Their Physical Properties, *J. Am. Ceram. Soc.*, 77-96 (1926)

⁵⁴ Ross, C. S., & S. B. Hendricks, Minerals of the Montmorillonite Group, *U. S. Geol. Survey Profess* 23-79 (1945)

⁵⁵ Hofmann, U., K. Endell, & D. Wilm, Kristallstruktur und Quellung von Montmorillonit, *Z. Krist.*, 340-347 (1933)

⁵⁶ Cronstedt, A., "Minerologie", Stockholm (1758). English translation by Magellan, John Hyacinth, London (1788)

⁵⁷ Kerr, P. F. Montmorillonite or Smectite as Constituents of Fuller's Earth and Bentonite, *Am. Mineral.*, 192-198 (1932)

⁵⁸ Svanberg, A., Saponit, *Akad. Handl. Stockholm*, p. 153 (1840)

⁵⁹ Svanberg, A., Saponit, *Ann. Physik Chem. (Poggendorff)*, 165-170 (1842)

⁶⁰ Ross, C. S., & P. F. Kerr, The Clay Minerals and Their Identity, *J. Sediment. Petrol.* 55-65 (1931)

El nombre de montmorilonita es muy usado para los minerales de arcilla con estructura expandible excepto la vermiculita. La vermiculita contiene una alta cantidad de alúmina y forma parte del grupo de la montmorilonita.

Las vermiculitas tienen una estructura expandible, pero difiere de las montmorilonitas en que su expansión puede ser solo en un grado limitado. Al igual que las montmorilonitas, las vermiculitas tienen una gran capacidad para el intercambio catiónico. La composición de éstas puede ser la misma que la montmorilonita, solo que difieren en su tamaño, éstas son más grandes.

Berthier⁶¹ propuso el nombre de nontronita al material asociado con la mena de manganeso en un lugar de Francia. El análisis químico mostró que éste mineral es hierrosilicato hidratado. La nontronita es el nombre general de un miembro del grupo de la montmorilonita que es rico en hierro.

La illita fue propuesta por Grim, Bray y Bradley⁶² en 1932 y su nombre deriva de la abreviatura de Illinois, EE.UU. De acuerdo a su fórmula la illita puede tener capas trioctaédricas y dioctaédricas.

El alemán Werner⁶³ fue el primero en usar el nombre de clorita en 1880. La clorita es un silicato hidratado de color verde. Muchos materiales arcillosos han sido descritos como cloritas, y ha habido mucha confusión con la identificación de las especies de este grupo.

Estructuralmente las cloritas tienen interestratificaciones de tamaño regular de capas de biotita y brucita. También se ha encontrado que las cloritas son un constituyente importante de muchos minerales de arcilla. La identificación de la clorita es muy difícil cuando también está presente la caolinita.

Los nombres sepiolita y Meerschaum son sinónimos. El nombre Meerschaum lo dio Werner en 1789, debido a su color (Meer-mar). El término sepiolita lo aplicó Glocker⁶⁴ en 1847, pero Dana dio la fórmula del mineral $2\text{H}_2\text{O} \cdot 2\text{MgO} \cdot 3\text{SiO}_2$. Años después Schaller⁶⁵ también determinó la fórmula de la sepiolita quedando $4\text{H}_2\text{O} \cdot 2\text{MgO} \cdot 3\text{SiO}_2$.

El nombre de palygorskita lo dio Fersman⁶⁶ al grupo de los silicatos hidratados que forman series isomórficas (isomorfismo cuando ciertos iones de un elemento pueden sustituirse por iones de otro, dejando la misma estructura cristalina pero formando algo que se puede considerar como una serie de disoluciones sólidas).

La atapulgita es el nombre que le dio De Lapparent⁶⁷ que en 1935 encontró en Attapulgua, Georgia, Quincy, Florida y Mormoliron, Francia. La estructura mineral de la atapulgita es similar al mineral anfíbol. Este mineral se clasificó con la sepiolita y la palygorskita, que son solubles en ácido.

No ha sido fácil establecer la nomenclatura de los minerales de arcilla y a la fecha se siguen estudiando las propiedades físicas, químicas y estructuras químicas, para así

⁶¹ Berthier, P., Nontronite nouveau mineral, *Ann chim et phys*, 22-27 (1827)

⁶² Grim, R. E., R. H. Bray, & W. F. Bradley, The Mica in Argillaceous Sediments, *Am Mineral*, 813-829 (1937)

⁶³ Werner, A. G. See J. D. Dana, "System of Mineralogy", 6th ed., p. 643 (1914)

⁶⁴ Glocker, E. F., "Generum et Specierum Mineralium secundum Ordines Naturales digestorum Synopsis" Halle (1847)

⁶⁵ Schaller, W. T., The Chemical Composition of Sepiolite (Meerschaum), *Am Mineral*, 202-210 (1936)

⁶⁶ Fersman, A., Studies in Magnesian Silicates, *Mem Acad Sci (St Petersburg) ser* 323-365 (1913)

⁶⁷ De Lapparent, J., Formula and Structure of Atapulgite, *Compt Rend*, 1726-1731 (1935)

poder establecer una clasificación más completa. Los avances en ésta área se han podido lograr gracias a las nuevas tecnologías que se han aplicado en este campo.

II.IV Interacción entre el agua y los minerales de arcilla

La naturaleza del agua a temperaturas bajas y los factores que controlan sus características son de gran importancia, ya que determinan la plasticidad, adherencia, compactación, suspensión y otras propiedades de los materiales arcillosos. Por lo tanto, es necesario comprender previamente la relación que existe entre el agua a baja temperatura y los minerales de arcilla, antes que entender otras propiedades de las arcillas, como la plasticidad.

El agua que se pierde a bajas temperaturas puede ser clasificada en tres categorías, dependiendo de la relación con los componentes minerales y a la temperatura de los materiales de arcilla, como sigue:

- 1 El agua en poros, en las superficies y alrededor de los fillos de las partículas discretas de los minerales que componen la arcilla.
2. En el caso de la vermiculita, montmorilonita y la forma hidratada de halloysita, el agua contenida entre las capas de estos minerales (agua que causa la expansión de la montmorilonita).
- 3 En el caso de los minerales sepiolita, atapulgita y palygorskita, el agua que se presenta en las aberturas tubulares entre las estructuras alargadas.

El agua de tipo 1 requiere generalmente muy poca energía para su remoción y secado; la temperatura ambiente es adecuada para su eliminación completa.

Las aguas de tipo 2 y 3 requieren de una energía definida para su eliminación completa. En el caso de la forma hidratada de la halloysita, secar a temperatura ambiente es adecuado para remover la mayoría del agua contenida entre las capas de minerales, pero se requiere de temperaturas más altas para su eliminación completa. En el caso de los minerales vermiculita y montmorilonita, se necesita de temperaturas de al menos 100 °C para una eliminación sustancial del agua contenida entre las capas del mineral.

En el caso de la halloysita, la reacción no es reversible y la forma hidratada original, no puede ser formada nuevamente. La vermiculita y la montmorilonita, se rehidratan con dificultad si la deshidratación fue total, pero con facilidad si permanecieron trazas de agua entre las capas del mineral. El agua en los canales de los minerales sepiolita, atapulgita y palygorskita se remueve a la misma temperatura que el agua entre las capas internas de los minerales de arcilla. El agua en los canales se recupera si el secado se dio a bajas temperaturas.

Naturaleza del agua adsorbida

Langmuir⁶⁸, Terzaghi⁶⁹, Hardy⁷⁰, Winterkorn⁷¹, y muchos otros⁷² han presentado evidencia que muestra que el agua adherida directamente a la superficie de las partículas de arcilla, esta en un estado físicamente distinto al del agua líquida.

Las características específicas de esta agua, que la diferencian del agua ordinaria, podrían deberse probablemente a la distancia entre las partículas de arcilla, distancias que generalmente son del orden de tres a 10 capas moleculares de agua (8 a 10 Å; 1 Å = 1×10^{-10} m). El posible espesor del agua no-ordinaria puede variar mucho, aun para un material arcilloso dado y la transición de agua no-ordinaria a agua ordinaria puede ser abrupta o gradual, dependiendo de los factores que se presenten.

Parece cierto que el posible espesor del agua no-ordinaria, también llamada no-líquida, sea relativamente pequeño en superficies irregulares, tales como aquellas que rodean los filos de las partículas de los minerales arcillosos, y relativamente largo en las superficies planas de los minerales arcillosos.

La partícula de agua no-ordinaria se desarrolla mejor y tiene un espesor mayor en las superficies planas de los minerales expansivos del grupo de la montmorilonita.

Así, el agua en los poros puede ser básicamente agua líquida, con una película delgada de agua no-líquida en la superficie de los poros.

Terzaghi⁶⁹ y muchos otros habían explicado inicialmente la naturaleza del agua adsorbida, basados en el carácter dipolar de la molécula de agua (en la molécula existen polos positivo y negativo).

Generalmente la superficie de la partícula de arcilla tiene carga negativa, lo que ocasiona que el polo positivo de las moléculas de agua se adhiera a ésta, quedando el polo negativo de la molécula hacia el exterior. De acuerdo a este concepto, la primera capa de moléculas de agua orientadas dipolarmente forman otra capa de carga negativa en la superficie, a la cual se podrá adherir una nueva capa de moléculas orientadas de agua.

Este proceso de formación de capas podría continuar indefinidamente, lo que no ocurre debido al hecho de que las moléculas de agua poseen energía térmica y tienden a estar en un estado de continuo movimiento. En concordancia con los conceptos clásicos de la teoría coloidal, el movimiento debido a energía térmica, se opondrá a la orientación regular de las moléculas. Por ello, en la superficie de los minerales de arcilla, las moléculas estarán muy orientadas, pero el grado de orientación disminuirá hacia el exterior, donde el efecto del movimiento térmico es mayor.

Macey⁷³, ha expuesto deficiencias de este concepto, particularmente por el hecho de que la superficie de los minerales de arcilla no es un plano cargado uniformemente y que las partículas de agua no actúan estrictamente como pequeños bastones con terminales positivas y negativas.

En algunas investigaciones, principalmente de Bernal y Fowler⁷⁴, y Bernal y Megaw⁷⁵, del enlace de hidrógeno y de la distribución de cargas en la molécula de agua, indujeron a

⁶⁹ Terzaghi, K., The Physical Properties of Clays, *Tech Eng News M I T*, 10, 11, 36 (1928)

⁷⁰ Hardy, W. B., Friction, Surface Energy, and Lubrication, "Colloid Chemistry", J. Alexander, ed, vol 1, pp 301-330, Reinhold, New York (1926)

⁷¹ Winterkorn, H. W., The Condition of Water in Porous Systems, *Soil Sci*, 109-115 (1943)

⁷² Grim, R. E., & F. L. Cuthbert, Some Clay-Water Properties of Certain Clay Minerals, *J Am Ceram. Soc*, 90-95 (1945)

⁷³ Macey, H. H., Clay-Water Relationships and the Internal Mechanism of Drying, *Trans Ceram Soc. (Engl)* 73-121 (1942)

⁷⁴ Bernal, J. D. & A. H. Fowler, A Theory of Water and Ionic Solution with Particular Reference to Hydroxyl Ions, *J Chem Phys* 515-518 (1933)

⁷⁵ Bernal, J. D. & B. D. Megaw, The Function of Hydrogen in Intermolecular Forces, *Proc Roy Soc (London) A*, 384-420 (1935)

Hendricks y Jefferson⁷⁶ al concepto de la naturaleza del agua adsorbida, basado en la orientación de las moléculas de agua en una estructura ligada a la configuración de oxígenos e hidroxilos en las capas de la superficie de las células de los minerales de arcilla. Según Hendricks y Jefferson, una capa de agua está compuesta de moléculas de agua unidas a grupos hexagonales, de una red hexagonal, como se muestra en la figura 2.3.

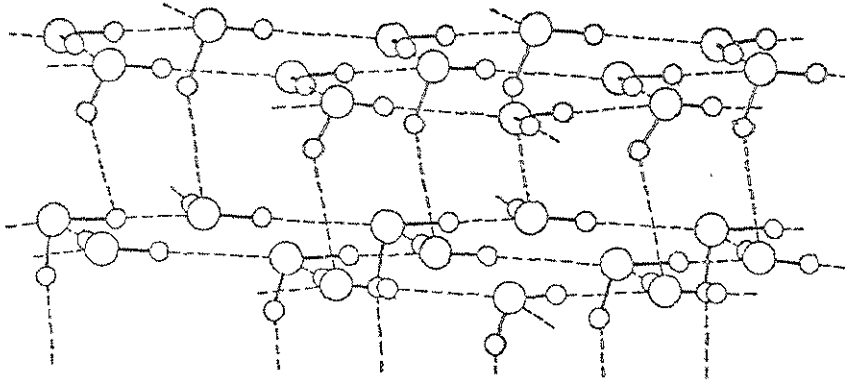


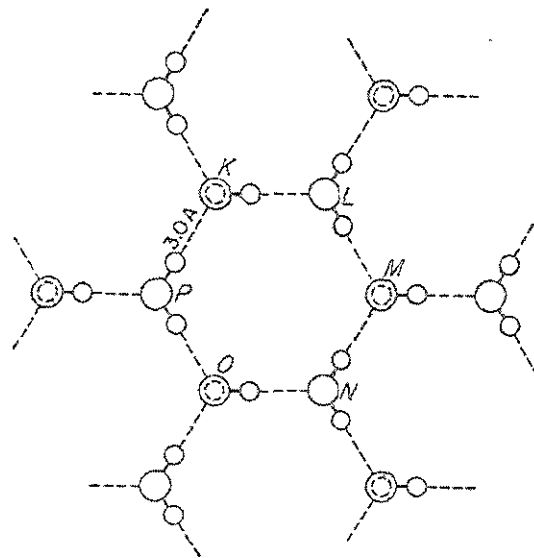
Figura 2.3 Configuración del agua adsorbida.

Este arreglo es el resultado de una distribución tetraédrica de carga en una molécula de agua; dos esquinas del tetraedro son ocupadas por átomos de hidrógeno y las otras dos esquinas por exceso de electrones. Cada lado del hexágono corresponde a un enlace de hidrógeno; el enlace de hidrógeno de cada molécula de agua se dará con moléculas vecinas de carga negativa.

La red se une a la superficie de los minerales de arcilla por la atracción entre los átomos de hidrógeno y la capa de oxígeno superficial de las moléculas de los minerales arcillosos, como se muestra en las figuras 2.4 y 2.5.

Cuando la superficie del mineral contiene grupos hidroxilo (como la halloysita y la caolinita), parte de los hidroxilos están libres para enlazarse mediante hidrógeno con los átomos de oxígeno de la capa de agua.

⁷⁶ Hendricks, S. B. & M. E. Jefferson, Structure of Kaolin and Talc-Pyrophyllite Hydrates and Their Bearing on Water Sorption, *J. Colloid Interface Sci.*, 23:278, 1967.



- Oxígenos
- Hidrógenos en el plano del oxígeno
- Hidrógenos abajo del plano del oxígeno

Figura 2.4 Arreglo de oxígenos e hidrógenos en la red del agua, propuesta por Hendricks y Jefferson.

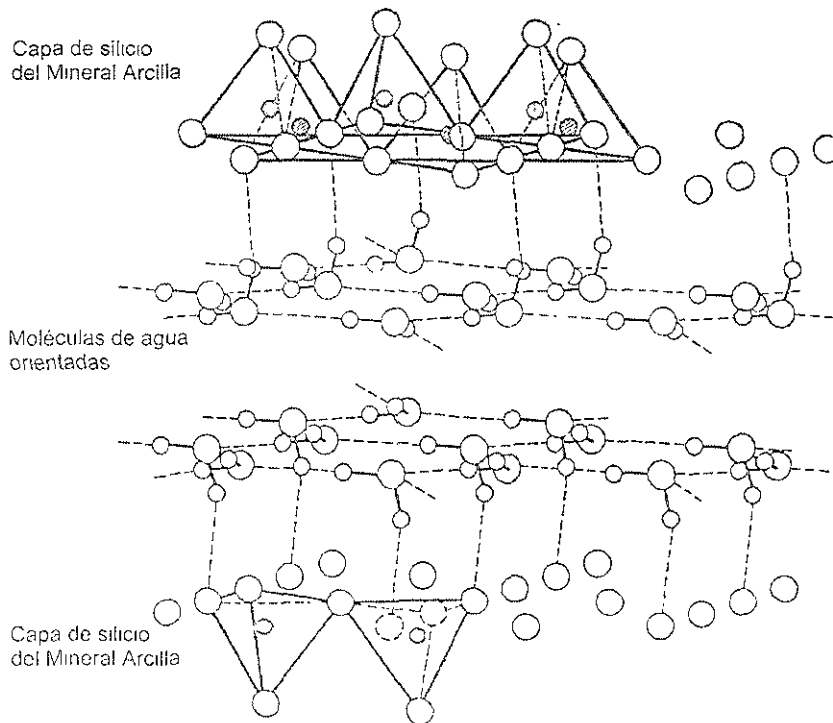


Figura 2.5 Configuración de la red de agua, propuesta por Hendricks y Jefferson.

La superposición sugerida⁷⁶ de la red de agua y las capas de oxígenos y las capas de hidroxilos se muestra en las figuras 2.6 y 2.7 respectivamente.

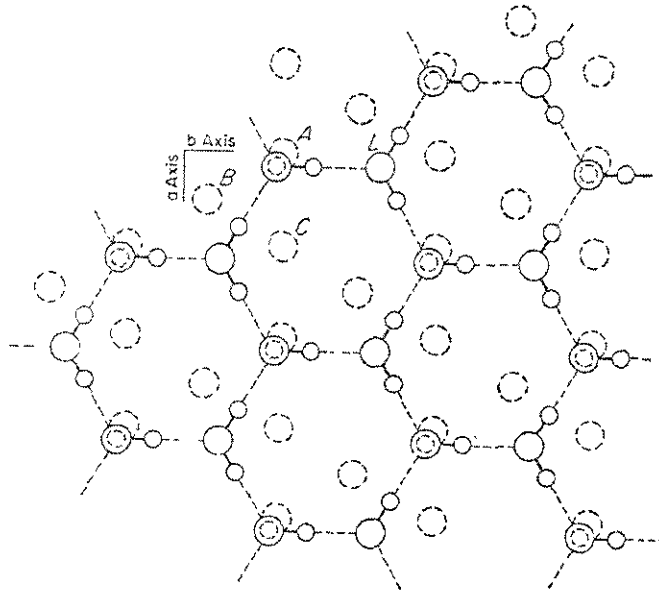


Figura 2.6 Superposición de la red de agua sobre capas de oxígeno de una vermiculita, propuesta por Hendricks & Jefferson.

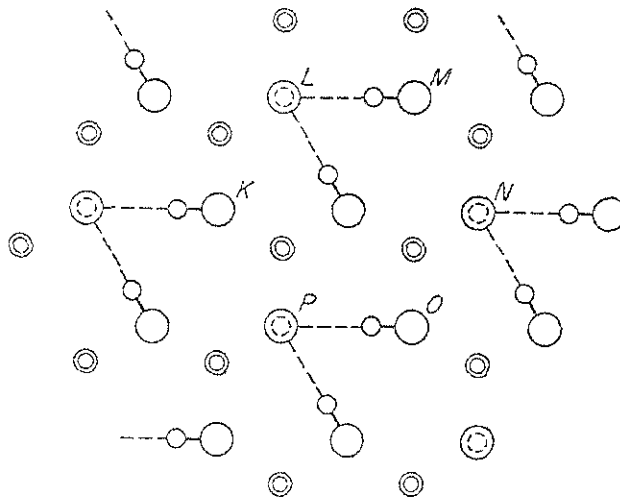


Figura 2.7 Superposición de la red de agua sobre capas de hidroxilos de dos capas de minerales de arcilla y la unión entre dos capas de agua e hidroxilos, propuesta por Hendricks y Jefferson.

La densidad del agua adsorbida puede variar de manera considerable; desafortunadamente su determinación tiene una gran dificultad experimental, y aunque se han publicado numerosas determinaciones, ninguna es completamente satisfactoria.

Tscapek⁷⁷ determinó una densidad de 1.7 y Hauser y Le Beau⁷⁸, estudiando suspensiones de bentonita, presentan valores mayores a 1. Por otro lado, Nitzsche⁷⁹ ha presentado determinaciones menores a 1 y más recientemente DeWit y Arens⁸⁰ han obtenido valores tan bajos como 0.73 en montmorilonitas.

Si se adiciona agua en incrementos pequeños a una arcilla seca, se necesita poca experiencia para saber cuando ha sido suficiente para que la arcilla adquiera una plasticidad óptima; esto se da cuando se ha añadido suficiente agua que satisfaga los requerimientos de todas las superficies disponibles con agua de configuración definida más un poco más de agua que se desarrollará en una configuración poco definida o indefinida de moléculas de agua⁸¹.

- Tscapek, W., The Density of Adsorbed Water in Soils, *Z. Pflanzenernähr. Düngung u. Bodenk.*, 265-271 (1934)
- Hauser, E., & D. S. Le Beau, Studies of Colloidal Clay, I, *J. Phys. Chem.*, 1031-1050 (1938).
- Nitzsche, W., On the Structure of the Hydration Hull of Inorganic Soil Colloids, *Kolloid-Z.*, 110-115 (1940)
- DeWit, C. T., & P. L. Arens, Moisture Content and Density of Some Clay Minerals and Some Remarks on the Hydration Patterns of Clay, *Trans. 4th Intern. Congr. Soil Sci.*, 59-62 (1950)
- Chen, R. F., Some Fundamental Factors Influencing the Properties of Soil Materials, *Proc. 2d Intern. Congr. Soil Mech.*, 3-11 (1950)

III. Estructura de los Minerales de Arcilla

III.1 Conceptos Generales

La estructura atómica de los minerales de arcilla más comunes ha sido determinada con mucho detalle por varios investigadores que se basaron en las generalizaciones de Pauling¹.

Dos unidades estructurales están involucradas en las estructuras atómicas de los minerales de arcilla. Una consiste en dos hojas de paquetes de oxígeno muy cercanos o hidróxidos (OH) en los cuales los átomos de aluminio, hierro o magnesio están fijos en la estructura octaédrica, equidistante de los seis oxígenos o hidróxidos (ver figura 3.1). La otra unidad está formada por tetraedros de silicio y en esta estructura cada átomo de silicio equidista de 4 O o OH. Los grupos de estos tetraedros forman redes hexagonales. (ver figura 3.2)

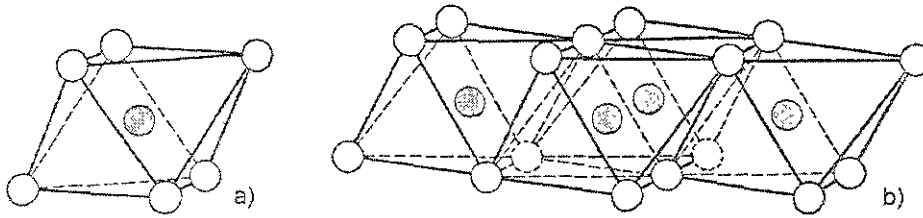


Figura 3.1 a) Unidad octaédrica de aluminio, magnesio, etc.,
b) Lámina octaédrica de aluminio, magnesio, etc.

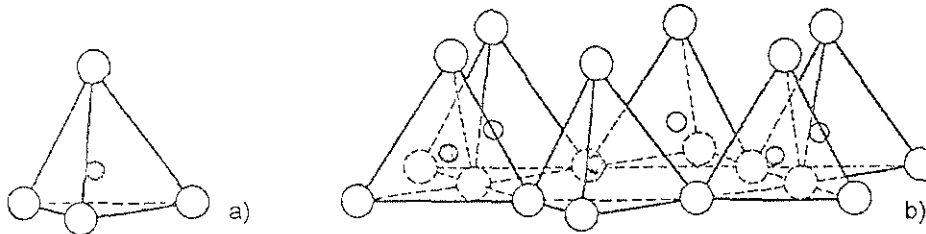


Figura 3.2 a) Tetraedro de silicio, b) Lámina tetraédrica de silicio

Existen algunos minerales de arcilla que son fibrosos y su composición estructural es diferente de las anteriores. Estos minerales se parecen a las características estructurales del mineral anfíbol, y su unidad estructural básica está compuesta por tetraedros de silicio que forman cadenas dobles con composición Si_4O_{11} .

Las cadenas están unidas por átomos de aluminio y/o magnesio que están rodeados por seis átomos activos de oxígeno cada uno. Los átomos activos de oxígeno son los que están unidos sólo por un silicio y por lo tanto a una arista de la cadena.

¹ Pauling, L. *The Nature of the Chemical Bond*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1935, pp. 122-126 (1930)

III.II Caolinita

La estructura de la caolinita fue sugerida de manera muy general por Pauling². Pero Gruner³ trabajó con más detalle la estructura de la caolinita y tiempo después Brindley y sus colegas^{4,5}. La estructura está compuesta por una lámina de tetraedros de silicio y una capa de octaedros de aluminio combinados en una sola unidad, y así los tetraedros de silicio y la lámina octaédrica forman una capa. Todos los extremos del tetraedro de silicio apuntan en la misma dirección y hacia el centro de la unidad de silicio y láminas octaédricas. (ver figura 3.3).

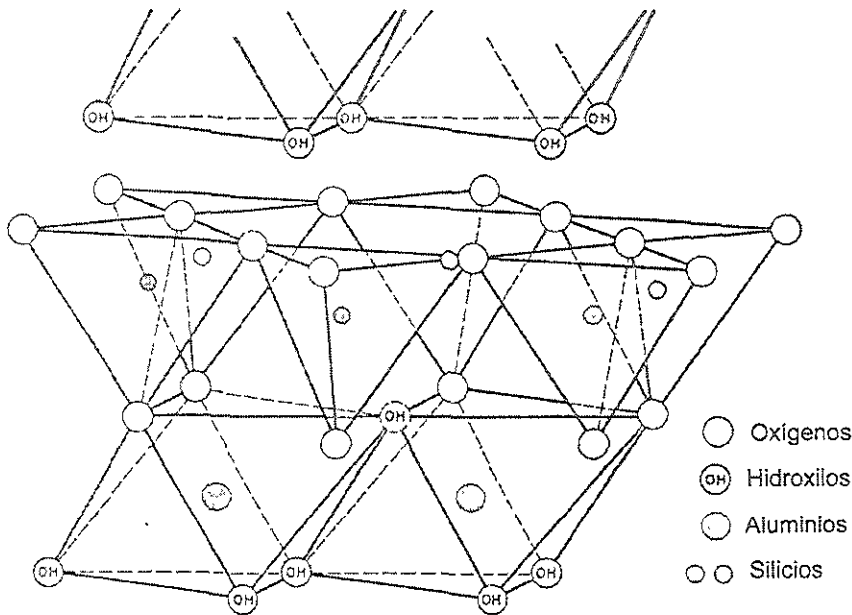


Figura 3.3 Estructura de la caolinita, propuesto por Gruner.

La fórmula estructural es $(OH)_8Si_4Al_4O_{10}$, y la composición teórica se expresa como sigue:

SiO ₂	46.54 %
Al ₂ O ₃	39.50 %
H ₂ O	13.96 %

La dickita⁶ y la nacrita⁷ tienen estructuras similares a la caolinita, pero éstas son raramente encontradas en los minerales de arcilla. La dickita tiene un apilamiento de capas no bien establecido y la conforman dos unidades de capas. La nacrita está compuesta por seis unidades de capas, llegando a formar un romboedro simétrico.

² Pauling, L., The Structure of the Chlorites, *Proc Natl Acad Sci U S.*, 578-582 (1930)

³ Gruner, J. W., The Cristal Structure of Kaolinite, *Z. Krist.*, 75-88 (1932)

⁴ Brindley, G. W., & K. Robinson, The Structure of Kaolinite, *Mineralog Mag.*, 242-253 (1946).

⁵ Brindley, G. W. The Kaolin Minerals, "X-Ray Identificación and Structure of the Clay Minerals", Chap. II, pp. 32-75, Mineralogical Society of Great Britain Monograph (1951)

⁶ Gruner, J. W., Cristal Structure of Dickita, *Z. Krist.*, 394-404 (1932)

⁷ Gruner, J. W., The Cristal Structure of Nacrite and a Comparison of Certain Optical Properties of the Kaolin Group with Its Structure, *Z. Krist.*, 343-364 (1930)

Los minerales del grupo de la caolinita son láminas continuas en las direcciones x y y , y un apilamiento de capas en la dirección z . Debido a su estructura química la caolinita no tiene un clivaje tan pronunciado como otros minerales de arcilla.

Las caolinitas ricas en silicio son llamadas anauxitas. Su estructura química consiste por unidades de caolinita entre las cuales existen láminas de tetraedros dobles de silicio.

III. III Halloysita

Se conocen dos formas de halloysita, una con composición $(OH)_8Si_4Al_4O_{10}$ y otra con $(OH)_8Si_4Al_4O_{10} \cdot 4H_2O$. Varios tipos de estructuras para las halloysitas han sido sugeridas por Mehmel⁸, Edeiman y Favejee⁹, Stout¹⁰ y Hendricks¹¹. Hendricks sugirió que la forma altamente hidratada de la halloysita está constituida por láminas de caolinita separadas por una capa de agua. Después Hendricks y Jefferson¹² encontraron que el agua molecular en esta capa tenía una determinada configuración. En los minerales de halloysita, las sucesivas capas de caolinita están acomodadas al azar en dos direcciones (ver figura 3.4).

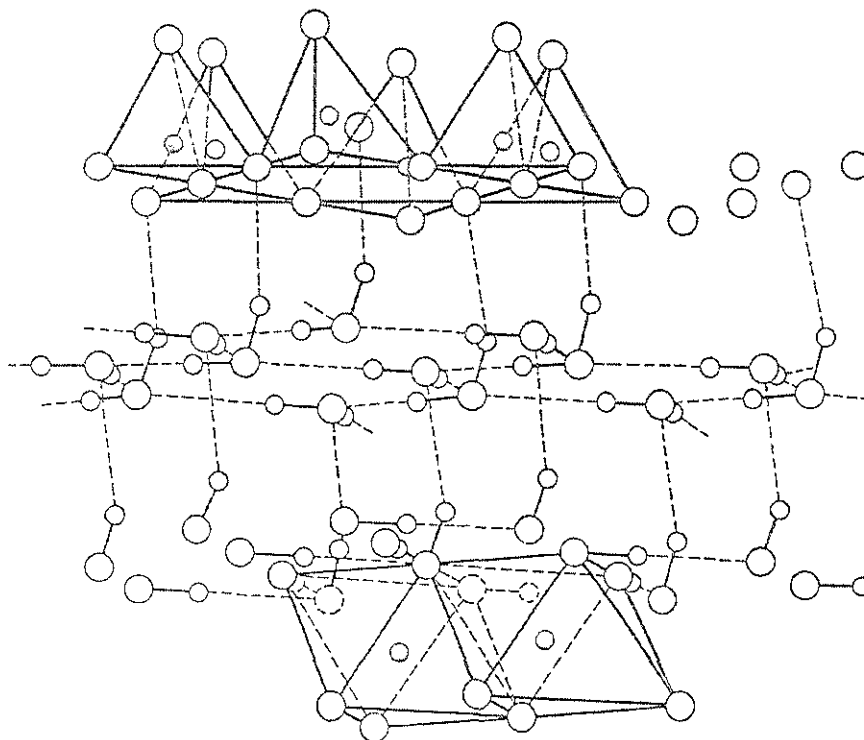


Figura 3.4 Estructura de la halloysita mostrando capas de agua, propuesto por Hendricks y Jefferson

⁸ Mehmel, M., Ueber die Struktur von Halloysit und Metahallosit, *Z. Krist.*, 35-43 (1935)

⁹ Edeiman, C. H. & J. C. L. Favejee, On the Crystal Structure of Montmorillonite and Halloysite, *Z. Krist.*, 417-431 (1940)

¹⁰ Stout, P. P., Alterations in the Crystal Structure of the Clay Minerals as a Result of Phosphate Fixation, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 177-182 (1939)

¹¹ Hendricks, S. B., On the Structure of the Clay Minerals: Dickite, Halloysite, and Hydrated Halloysite, *Am. Mineral.*, 295-301 (1937)

¹² Hendricks, S. B., & M. E. Jefferson, Structures of Kaolin and Talc-Pyrophyllite Hydrates and Their Bearing on Water Sorption of the Clays, *Am. Mineral.*, 853-875 (1938)

Brindley y sus colegas¹³ estudiaron la transición de la forma hidratada de la halloysita a la forma deshidratada de este mineral con mucho detalle. De acuerdo con ellos, solo la deshidratación parcial se lleva a cabo a bajas temperaturas (60° a 75°C) y a temperatura del orden de 400°C se remueve totalmente el agua entre las capas.

III.IV Montmorilonita

Actualmente las estructuras generalmente aceptadas de la montmorilonita es la sugerida por Hofmann, Endell y Wilm¹⁴ en 1933, y modificada por las aportaciones de Maegdefrau y Hofmann¹⁵, Marshall¹⁶ y Hendricks¹⁷. De acuerdo con este concepto, la montmorilonita está compuesta por dos láminas tetraédricas de silicio con una lámina octaédrica central de aluminio. Con todos los extremos del tetraedro apuntando en la misma dirección y hacia el centro de la unidad. Las láminas del tetraedro y octaedro se combinan y comparten oxígenos, en vez de hidróxidos (OH), formando una sola lámina. Las capas son continuas en las direcciones x y y, y las capas se apilan una sobre otra en una dirección z

Este tipo de estructura tiene un clivaje perfecto. El rasgo característico de la estructura de la montmorilonita es que el agua y otras moléculas polares (como pueden ser moléculas orgánicas), pueden estar presentes entre las capas, provocando que la estructura se expanda en la dirección z. (ver figura 3.5).

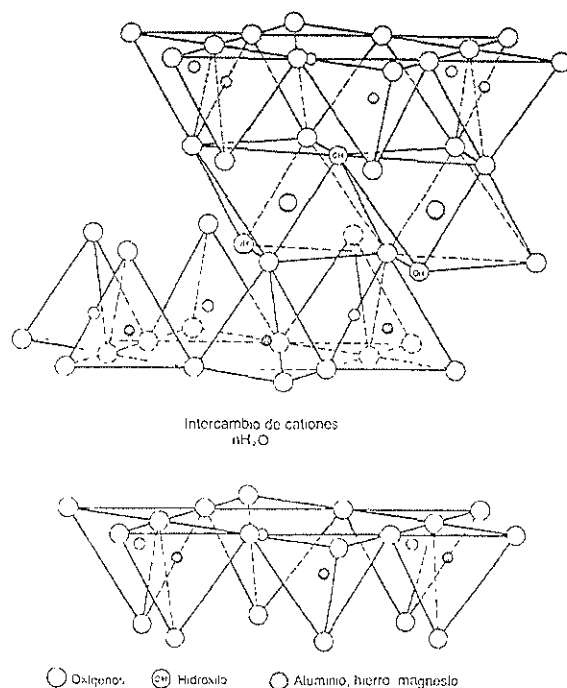


Figura 3.5 Estructura de la montmorilonita, propuesta por Hofmann, Endell, Wilm, Marshall y Hendricks.

¹³ Brindley G. W. & K. Robinson, X-ray Studies of Halloysite and Metahalloysite, I, The Structure of Metahalloysite, *Amer. J. Sci.* 393-407 (1946)

¹⁴ Hofmann, U., K. Endell & D. Wilm, Kristallstruktur und Quellung von Montmorillonit, *Z. Krist.*, 340-348 (1933)

¹⁵ Maegdefrau, E. & U. Hofmann, Die Kristallstruktur des Montmorillonits, *Z. Krist.*, 299-323 (1937)

¹⁶ Marshall, C. L., Layer Lattices and Base-Exchange Clays, *Z. Krist.*, 433-449 (1935)

¹⁷ Hendricks, L. B., The Structure of Clay Minerals and Some Properties of Clays, *J. Geol.*, 275-293 (1942)

En el caso de absorción de las moléculas orgánicas polares entre las capas de silicatos, la expansión en el eje z depende del tamaño y geometría de la molécula orgánica. El espesor de las capas de agua entre las unidades de silicatos depende de la naturaleza del intercambio catiónico.

La fórmula teórica sin considerar las sustituciones (que son las impurezas) en la estructura es $(OH)_4Si_8Al_4O_{20}nH_2O$ (entre capas) y entonces la composición teórica sin el material entre capas es:

SiO ₂	66.7 %
Al ₂ O ₃	28.3 %
H ₂ O	5.00 %

Pero Marshall¹⁶ y Hendricks¹⁷ determinaron la fórmula estructural de la composición química de varias montmorilonitas y mostraron las sustituciones, así como sus composiciones parciales dentro de la estructura. La nomenclatura de los miembros del grupo de la montmorilonita dependen de la sustituciones en la estructura (ver cuadro 3.1).

Montmorilonitas Dioctaédricas

Montmorilonita	$(OH)_4Si_8(Al_{3.34}Mg_{.66})O_{20}$
Beidelita	$(OH)_4(Si_{6.34}Al_{1.66})Al_{4.34}O_{20}$ $(OH)_4(Si_6Al_2)Al_{4.44}O_{20}$
Nontronita	$(OH)_4(Si_{7.34}Al_{.66})Fe_{4.34}^{3+}O_{20}$ $(OH)_4(Si_{6.34}Al_{1.66})Fe_{4.34}^{3+}O_{20}$

Montmorilonitas Trioctaédricas

Hectorita	$(OH)_4Si_8(Mg_{5.34}Li_{.66})O_{20}$
Saponita	$(OH)_4(Si_{7.34}Al_{.66})Mg_{6}O_{20}$ $(OH)_4(Si_{6.66}Al_{1.34})(Mg_{5.34}Al_{.66})O_{20}$

Cuadro 3.1 Fórmulas de algunos miembros del grupo de la montmorilonita, propuesto por Ross y Hendricks.

III.V Ilita

La unidad estructural básica está compuesta de dos láminas tetraédricas de silicio con una lámina central octaédrica. Los extremos de cada lámina tetraédrica de silicio apuntan hacia el centro de la unidad y se combinan con la lámina octaédrica con reemplazamientos o sustituciones de OH por O. Esta estructura es igual a la montmorilonita excepto porque algunos silicios siempre son reemplazados por aluminio y la carga resultante se balancea con iones de potasio. La unidad estructural crece en dos dirección (x y y) y se apilan las láminas en la dirección z.

La illita tiene la estructura de las micas, por lo tanto, sus variaciones en composición y polimorfismos se han estudiado mucho por Pauling¹, Mauguin¹⁸, Jackson y West¹⁹, Winchell²⁰ y Hendricks y Jefferson²¹.

La mayoría de los minerales de arcilla illita son dioctaédricos, pero algunos son trioctaédricos. Los análisis de difracción de rayos X permiten la identificación de los polimorfismos si la muestra es relativamente pura y su cristalinidad no es muy pobre. En algunos casos no es posible identificar los polimorfismos de la illitas.

Las illitas dioctaédricas remplazan el aluminio por hierro o por magnesio. La glauconita²² es un ejemplo de este reemplazo, quedando su estructura como una lámina de silicio entre láminas de micas dioctaédricas (ejemplo de una mica dioctaédrica es la moscovita).

Es de esperarse que los minerales arcillosos al estar en contacto con agua, penetra el agua entre las capas produciendo una expansión. En la illita, la expansión entre las láminas no es apreciable debido a su estructura química. Por esto, a la montmorillonita se le define como expansiva y a la illita como no expansiva.

III.VI Clorita

La estructura de la clorita fue sugerida por Pauling². Después McMurchy²³ estudió este mineral con mucho detalle verificando lo sugerido por Pauling y añadiendo información sobre la simetría y dimensiones de la cloritas. Brindley y Robinson^{24 25} estudiaron también el mineral y ampliaron el conocimiento sobre éste.

Todas las cloritas tienen la misma estructura general, que consiste en una capa de mica (grupo de los filosilicatos) y una de brucita (mineral del grupo hidróxidos). Las capas son continuas en la dirección x y y, su apilamiento es en la dirección z donde también se presenta su clivaje. Las capas de mica son trioctaédricas, con composición general $(OH)_4(SiAl)_8(Mg Fe)_6 O_{20}$ y la brucita con composición general $(Mg Al)_6(OH)_{12}$. La capa de mica sustituye Al^{3+} por Si^{2+} para su balanceo, y la brucita Al^{3+} por Mg^{2+} . El esquema general de la clorita se ve en la figura 3 6.

Varios miembros de este grupo difieren de tipo y cantidades de sustituciones así como la orientación de las capas. Se encontró que la clorita tiene polimorfismos, que consisten en diferentes tipos de apilamiento.

¹⁸ Mauguin, C. H., Etude des micas au moyens des rayons X, *Bull. soc. franç. minéral.*, 285-332 (1928)

¹⁹ Jackson, W. W. & J. West, The Crystal Structure of Muscovite, *Z. Krist.*, 160-164 (1933)

²⁰ Winchell, A. N., Studies in the Mica Group, *Am. J. Sci.* ser. 5, 415-430 (1925)

²¹ Hendricks, S. B., & M. Jefferson, Polymorphism of the Micas with Optical Measurements, *Am. Mineral.*, 729-771 (1939)

²² Hendricks, S. B., & C. S. Ross, The Chemical Composition and Genesis of Glauconite and Celadonite, *Am. Mineral.*, 683-694 (1934)

²³ McMurchy, R. C., Structure of Chlorites, *Z. Krist.*, 420-432 (1934)

²⁴ Brindley, G. W., & G. W. Brindley, Structure of Chlorites, *Proc. Leeds Phil. Lit. Soc. Sci. Sect.*, 102-106 (1948)

²⁵ Brindley, G. W., & K. Robinson, The Chlorite Minerals, "X-ray Identification and Structure of the Clay Minerals", Chap. VI, *Clay Minerals*, McGraw-Hill, New York, London, Toronto, 1951.

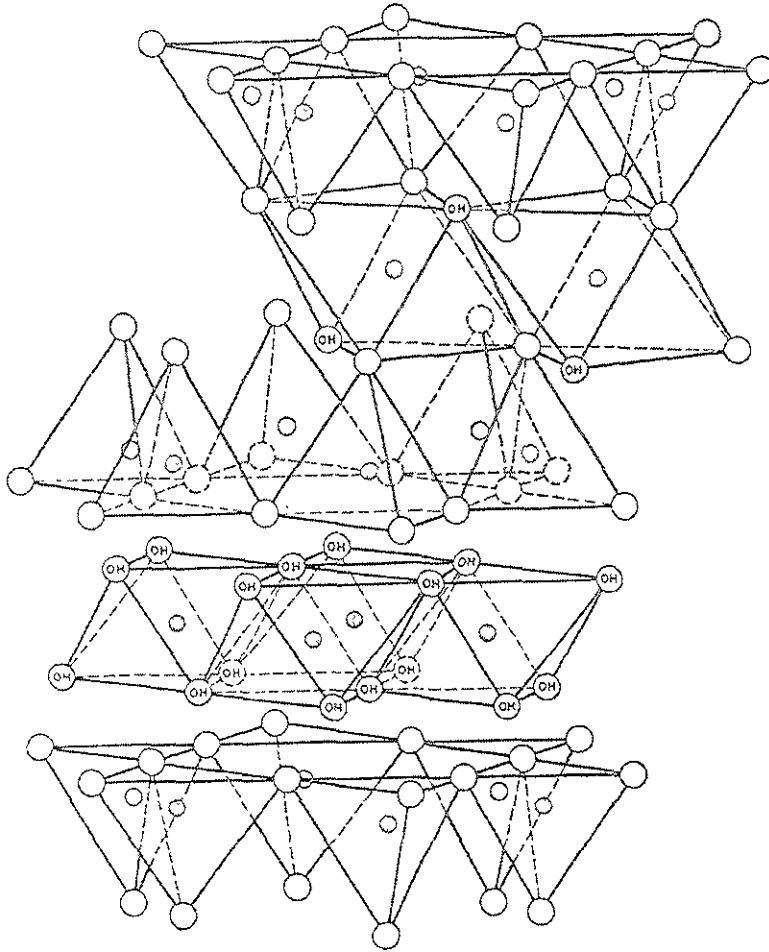


Figura 3.6 Estructura de la clorita,
propuesta por McMurphy.

III.VII Vermiculita

La estructura de la vermiculita fue estudiada primero por Gruner^{26 27} y más tarde por Hendricks y Jefferson^{28 12} confirmaron las conclusiones de Gruner pero cambiando algunos detalles de su estructura. Barshad^{29 30 31} y Walker^{32 33} trabajaron de manera independiente aportando muchos conocimientos sobre la estructura de este mineral.

²⁶ Gruner, J. W., Vermiculite and Hydrobiotite Structures, *Am Mineral*, 557-575 (1934)

²⁷ Gruner, J. W., Water Layers in Vermiculite, *Am Mineral*, 428-433 (1939).

²⁸ Hendricks, S. B., & M. E. Jefferson, Crystal Structure of Vermiculites and Mixed Vermiculite-chlorites, *Am Mineral*, 851-863 (1938)

²⁹ Barshad, I., Vermiculite and Its Relation to Biotite, *Am Mineral*, 655-678 (1948).

³⁰ Barshad, I., The Nature of Lattice Expansion and Its Relation to Hydration in Montmorillonite and Vermiculite, *Am Mineral*, 675-684 (1949)

³¹ Barshad, I., The Effect of Interlayer Cations on the Expansion of the Mica Type Crystal Lattice, *Am Mineral*, 225-238 (1950)

³² Walker, G. F., Water Layers in Vermiculite, *Nature*, 726 (1949)

³³ Walker, G. F., Vermiculite and Some Related Mixed-Layer Minerals, 'X-ray Identification and Structure of the Clay Minerals', *Clay Minerals*, 189-223 Mineralogical Society of Great Britain Monograph (1951)

Gruner²⁶ mostró que la estructura de la vermiculita consiste en láminas (filosilicatos) trioctaédricos de mica o talco separadas por capas de moléculas de agua que ocupan un espacio el cual tiene un espesor de dos moléculas de agua. En su estado natural, el mineral tiene capas alternadas de mica y dos capas de agua.

Esta estructura tiene sustituciones de Al^{3+} por Si^{4+} , y la fórmula general está dada por $(\text{OH})_4(\text{Mg Ca})_x(\text{Si}_{8-x}\text{Al}_x)(\text{Mg Fe})_6 \text{O}_{20} \cdot y\text{H}_2\text{O}$ donde los valores de x están entre 1 y 1.4, mientras que el de y es de aproximadamente 8.

A una temperatura mayor de 500°C , el agua desaparece de las capas de mica, pero se rehidrata rápidamente en un cuarto húmedo. Al estar en contacto con la humedad este mineral se expande, pero su expansión es limitada (al contrario de la montmorilonita). Ha habido muchas discusiones sobre la estructura exacta de las capas de agua en la vermiculita (ver figura 3.7).

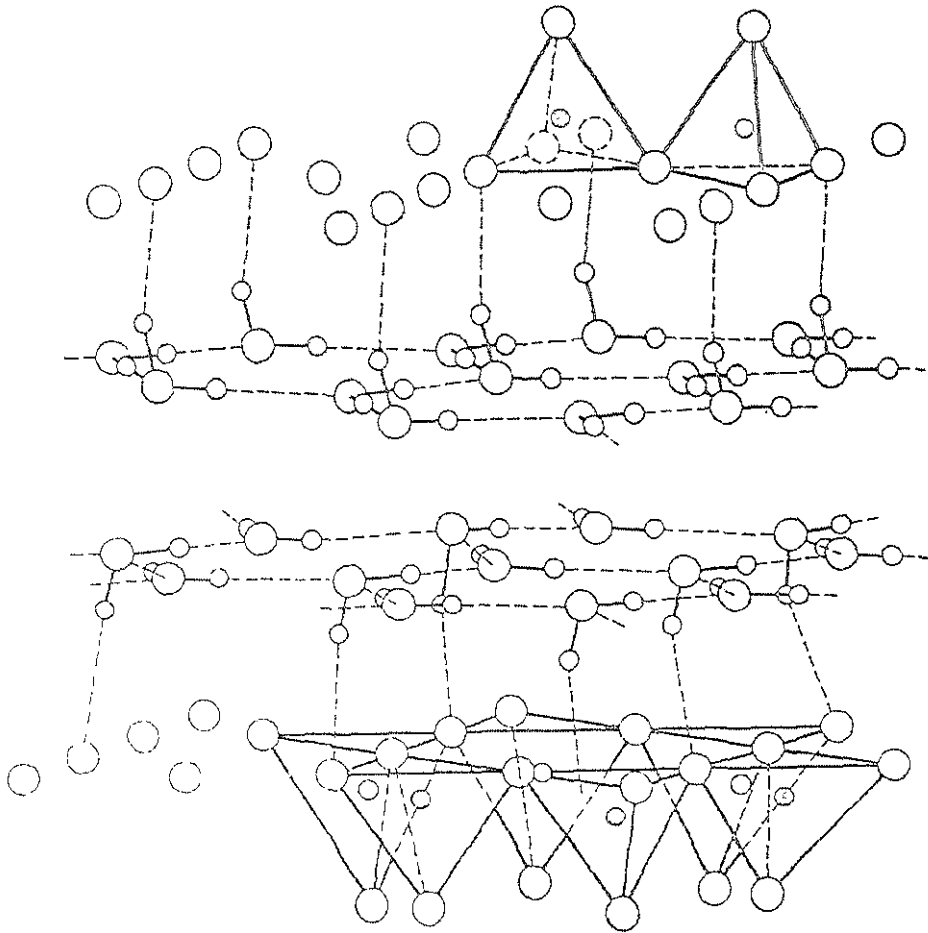


Figura 3.7 Estructura de la vermiculita mostrando capas de agua, propuesto por Hendricks y Jefferson.

III.VIII Otras

La estructura general y composición de varios minerales no es muy conocida (como la sepiolita, palygorskita y atapulgita). Longchambon³⁴ sugirió la fórmula para la sepiolita que es la siguiente $\text{Si}_4\text{O}_{11}(\text{Mg H}_2)_3 \text{H}_2\text{O} \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$. Existen sustituciones en la sepiolita de Mg por Fe o Al. Migeon³⁵ y Longchambon³⁴ señalaron que la sepiolita contiene agua zeolítica en su estructura, y la pierde a la temperatura de 300°C.

La atapulgita fue estudiada por De Lapparent³⁶ ³⁷ y después con mucho detalle por Bradley³⁸. La atapulgita contiene dos cadenas de silicio que corren de manera paralela en un eje z, y estas cadenas unidas por oxígenos.

Muchas arcillas están compuestas por más de un mineral de arcilla, y los minerales de arcilla se pueden mezclar de muchas formas. La mezcla puede ser de partículas discretas del mineral de arcilla, en el cual no es importante la orientación geométrica de una partícula con respecto a la partícula vecina.

Existen dos tipos de estructuras:

1. Una interestratificación regular; por ejemplo el apilamiento a lo largo del eje z. En estos casos la estructura resultante tiene características distintivas, como la reflexión (Reflexión, propiedad del movimiento ondulatorio por la que una onda retorna al propio medio de propagación tras incidir sobre una superficie).
2. Una interestratificación irregular, en la cual no es uniforme la repetición de las capas.

Las estructuras mezcladas son muy comunes en los minerales de arcilla. Su estudio es difícil y en muchos casos los investigadores han fallado al reconocer su estructura. Las estructuras mezcladas más comunes son illita y montmorilonita, clorita y vermiculita; mientras que la illita y la caolinita no es muy común.

Para identificar las estructuras de la mezcla de arcilla es necesario trabajar con técnicas de difracción de rayos X.

³⁴ Longchambon, H., Sur certaines caractéristiques de la sepiolite d'Ampandandrava et la formule des sepiolites, *Bull. soc. franç. minéral.* 232-276 (1937)

³⁵ Migeon, G., Contribution à l'étude de la définition des sepiolites, *Bull. soc. franç. minéral.*, 6-133 (1936)

³⁶ De Lapparent, J., Défense de l'atapulgitite, *Bull. soc. franç. minéral.*, 253-283 (1938)

³⁷ De Lapparent, J., À propos de l'atapulgitite, *Compt. rend.* 971-974 (1941)

³⁸ Bradley, W. T., The Structure of Atapulgitite, *Am. Mineral.* 405-410 (1945)

IV. Límites de Consistencia (Atterberg)

Los límites de consistencia también son conocidos como Límites de Atterberg, que es un método para describir cuantitativamente el efecto de la variación del contenido de agua en la consistencia de suelos finos (aquellos que pasan la malla No. 40 -0.42 mm-). Las especificaciones y procedimiento para la obtención del contenido de agua están bajo normas de la ASTM, ASTM D2216-98, ver Anexo.

A. Atterberg, científico sueco, desarrolló este método en 1911; él trabajó en la industria de la cerámica, y en ese tiempo sólo existían algunas pruebas sencillas para determinar la plasticidad¹ de una arcilla² con la que se trabajaría. En la industria de la cerámica es muy importante conocer sobre la plasticidad para moldear ladrillos, por ejemplo, y así evitar la contracción y agrietamiento al fuego de estos.

Después de muchos experimentos, Atterberg llegó a la conclusión de que al menos dos parámetros se necesitaban para definir la plasticidad de las arcillas -límite superior e inferior de la plasticidad-. Todo esto lo desarrolló en un laboratorio muy sencillo basándose en que los suelos plásticos cambian su consistencia al variar su contenido de agua y también su volumen, por esto la mezcla suelo-agua puede existir en cualquier estado de la materia, definiendo los límites de consistencia como siguen:

1. Límite Superior de un flujo viscoso
2. Límite Líquido (LL) -límite inferior de un flujo viscoso
3. Límite de Adhesión - cuando las arcillas pierden su adhesión a una espátula
4. Límite de Cohesión - cuando deja de existir adherencia entre las partículas
5. Límite Plástico (LP) - límite inferior del estado plástico
6. Límite de Contracción (LC) - límite inferior del cambio de volumen

Cada límite se define por el contenido de agua que produce una consistencia determinada; la diferencia entre los límites representa la variación en el contenido de agua (w) o humedad dentro de la cual el suelo se mantiene en un cierto estado. El límite de Adhesión y el de Cohesión son usados en la industria de la cerámica y en agricultura. Los límites están dirigidos para suelos totalmente remoldeados, y tienen que ver con la estructura y el comportamiento de las arcillas o de suelos finos en general.

Otra aportación de Atterberg, fue la definición del Índice Plástico (IP). El IP es el rango de contenido de agua donde el suelo se comporta de manera plástica; y fue el primero en sugerir que esto podría ser usado como clasificación de los suelos finos. Se expresa en la siguiente expresión:

$$IP = LL - LP$$

¹ Es la propiedad que tienen algunos suelos de deformarse sin agrietarse, no producir rebote elástico, ni tener una variación volumétrica apreciable -esto es producida debido a su contenido de partículas finas de forma laminar-

² Se conocen como arcillas a aquellos suelos de tamaño menor a dos micras y que su composición química obedece a la fórmula del agua en moléculas de oxígeno de aluminio y silicio, y que sus partículas son de forma laminar

donde

IP = Índice plástico

LL = Límite líquido

LP = Límite plástico

El IP nos proporciona una medida de las propiedades cohesivas del suelo e indica el grado de la actividad química de la superficie, las propiedades vinculadas de una arcilla y la fracción coloidal de la materia.

En el análisis de pavimentos, un IP alto indica que la superficie se pondrá resbalosa en tiempo húmedo, y si el IP es bajo el pavimento se pondrá friable (que se desmenuza fácilmente) y se desgastará con poco tráfico.

Realmente los Límites de Atterberg significan poco por sí mismos, pero como índice de las propiedades características del suelo son muy útiles ya que proporcionan una clasificación del suelo fino y se correlacionan con las propiedades del suelo, especialmente para los ingenieros civiles, porque el suelo es usado como un material de construcción y soporta estructuras con diferentes tipos de cimentaciones.

Cuando surgió la necesidad de mejorar y economizar los diseños estructurales y procedimientos constructivos se realizaron estudios detallados de la naturaleza y propiedades del suelo, como el caso de Karl von Terzaghi³ en 1925 en su libro *Erdbaumechanik*; presentando los principios fundamentales de la mecánica de suelos.

En los 20's Karl von Terzaghi y Arthur Casagrande⁴ (1932) trabajaron para The United States Bureau of Public Roads, y estandarizaron los Límites de Atterberg, añadiendo nuevas propuestas para la clasificación de suelos finos

³ Nació en Praga el 2 de octubre de 1883 y murió en 1963 en Winchester, Massachusetts. Fue reconocido como el Padre de la Mecánica de Suelos. Los primeros años de su carrera profesional los dedicó a la búsqueda de un método racional para abordar los problemas de la ingeniería de suelos y cimentaciones, publicados en su libro *Erdbaumechanik* en 1925.

De 1925 a 1929 Terzaghi trabajó en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (ITM) donde inició el primer programa estadounidense sobre mecánica de suelos y consiguió darle la importancia en la ingeniería civil. Terzaghi, pasó a la Universidad de Harvard en 1938 donde desarrolló y expuso el curso de geología aplicada a la ingeniería civil.

El libro *From Theory to Practice in Soil Mechanics* (Wiley, 1960), tiene una amplia documentación de la carrera de Terzaghi. A Terzaghi se le otorgaron varios premios honoríficos, como la Medalla Norman de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) en los años 1930, 1943, 1946 y 1955. Nueve universidades le dieron el título de doctor *honoris causa*. Durante muchos años fue Presidente de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos y Cimentaciones.

Terzaghi trabajó e influenció fuertemente en la mecánica de suelos hasta sus últimos días. Los escritos de Karl von Terzaghi aportan conocimientos principalmente de la teoría de la consolidación, el proyecto y construcción de cimentaciones, el cálculo de ataguías y el mecanismo de deslizamiento de taludes, y sobre todo la metodología para tratar de resolver problemas en la mecánica de suelos.

ASCE creó la *Terzaghi Lecture* en su honor y el Premio Terzaghi.

Arthur Casagrande nació en Austria el 28 de agosto de 1902. Emigró a los Estados Unidos en 1926 donde desarrolló trabajos de asistencia técnica para el *Bureau of Public Roads* trabajando bajo la dirección de Terzaghi en el ITM. Durante su estancia en este instituto trabajó en la clasificación de suelos, pruebas de corte y acción de la helada en los suelos. En 1932 inició un programa de enseñanza de la mecánica de suelos en la Universidad de Harvard.

Los trabajos de Casagrande en clasificación de suelos, filtración a través de presas de tierra y resistencia al esfuerzo cortante, tuvieron una influencia fundamental en la mecánica de suelos. Casagrande trabajó como consultor y su obra ha

Ellos utilizaron la investigación de Atterberg para expresar en la forma más clara los estados de consistencia quedando sólido (cuando el volumen del suelo no varía con el secado), semisólido (cuando el suelo tiene la apariencia de un sólido, pero aún disminuye su volumen al secado), plástico (cuando el suelo se comporta plásticamente) y líquido (cuando el suelo tiene las propiedades y apariencia de una suspensión). Estos cambios se dan cuando el contenido de agua en las masas de suelo varía. Para definir las fronteras en esos estados realizaron muchas investigaciones (ver figura 4.1).

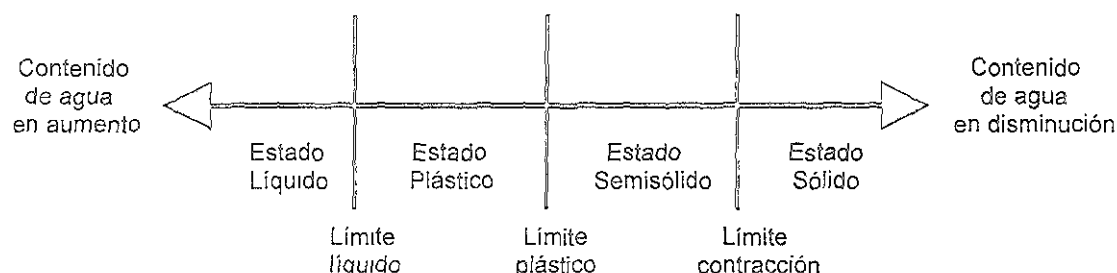


Figura 4.1 Estados de Consistencia de la materia

Los estudios de A. Atterberg, Karl von Terzaghi y Goldschmidt han mostrado que la plasticidad de los suelos es producto de la carga eléctrica de las partículas laminares, que generan campos eléctricos, almacenando energía como lo hace un condensador e influyen en las moléculas bipolares del agua.

IV.1 Límite Líquido, Plástico y de Contracción

Límite líquido

Las pruebas originales de límites de consistencia de Atterberg no eran fácilmente reproducibles por un operador inexperto, entonces A. Casagrande (1932, 1958) trabajó para estandarizar estas pruebas, y desarrolló un dispositivo para determinar el límite líquido, con el fin de volver la prueba más independiente del tipo de operador; este dispositivo fue la Copa de Casagrande

Copa de Casagrande

Arthur Casagrande definió el Límite Líquido (LL) al contenido de agua de un suelo remoldeado en el que se practica una ranura de dimensiones estandarizadas y ésta se cierre por el impacto de 25 golpes en la Copa de Casagrande (ver figura 4.2), cuyo funcionamiento será descrito mas adelante

... sido de gran importancia en todo el mundo, pero su trabajo como docente se considera lo mas importante porque formó a muchos investigadores prominentes en la Mecánica de Suelos
 Fue presidente de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos y Cimentaciones de 1961 a 1965. Profesor de Honor de la Universidad de California por la ASCE y primer en recibir el premio Karl Terzaghi de la ASCE

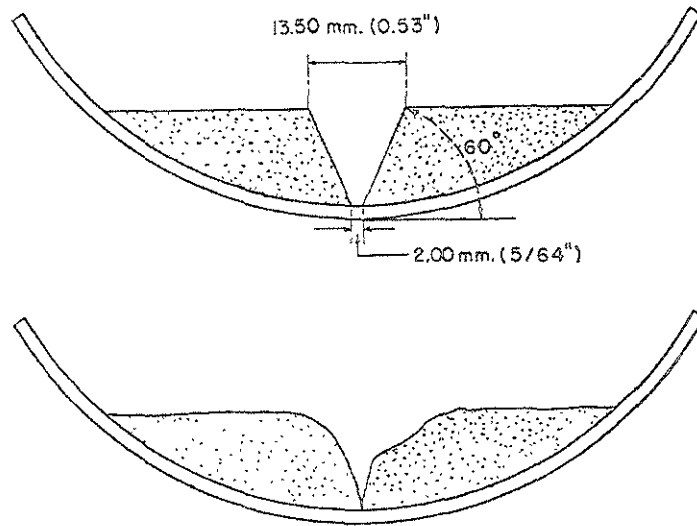


Figura 4.2 Material en la copa mostrando las dimensiones de la ranura, y en la parte inferior la ranura cerrada debido a los golpes.

Arthur Casagrande propone graficar los contenidos de agua contra los golpes de la copa en escala semilogarítmica. Llamando a la curva que resulta por pasar por los puntos como curva de fluidez, siendo el LL el punto de la curva de fluidez que corresponda a los 25 golpes. Este resultado nos indica el contenido de humedad en porcentaje, en qué el suelo cambia del estado líquido al estado plástico.

Algunas veces con un solo punto de la prueba de Casagrande se puede determinar el LL, siempre y cuando el golpe esté entre 10 y 40, y se tenga un estudio previo de un suelo de origen geológico similar.

$$LL = \omega_n \left(\frac{n}{25} \right) \tan \beta$$

donde

LL = Límite Líquido

ω_n = Contenido de agua del punto

n = número de golpes

β = pendiente de la curva de fluidez del estudio previo de un suelo de origen geológico similar.

Skempton⁵ también estudió los límites de consistencia y encontró que el suelo en el límite líquido tiene una resistencia al cortante aproximadamente de 0.07 kg/cm^2 . Este estudio lo realizó basándose en un líquido newtoniano que tiene una resistencia de cero al cortante, pero la resistencia al cortante va en aumento de manera lineal con la viscosidad del líquido. Encontrando que la temperatura, la disolución de iones y el comportamiento magnético de un suelo fino influyen fuertemente en los compuestos de manera molecular. Si el contenido de agua decrece en una mezcla, las arcillas tienden a interactuar con otras, debido a la dipolaridad del agua (provocando un enlace magnético), porque son débiles sus vínculos y continuamente se forman y rompen.

Actualmente se sigue utilizando la Copa de Casagrande pero también hay técnicas alternativas basadas en la penetración de un cono por su propio peso. Existen varios tipos de conos, a continuación serán descritos.

Conos de Penetración

Existen varios tipos de cono de penetración los cuales serán descritos a continuación. Cabe mencionar que la investigación se realizó con el cono inglés, ya que el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería cuenta con este equipo.

Cono Sueco

El Cono Sueco fue el primer cono de penetración, y fue inventado por John Olsson en 1915. Este cono es utilizado en Suecia y países escandinavos en comparación a la Copa de Casagrande, ya que su correlación entre estos dispositivos es muy similar, en los suelos suecos y escandinavos. El dispositivo consta de un pedestal con un brazo ajustable verticalmente, en dicho brazo es colocado el cono y ajustado a la base que contiene la muestra de suelo, éste ajuste se logra cuando la punta del cono apenas roza la superficie de la muestra. El peso del cono (vástago y punta) tiene un peso de 60 g y cuenta con un ángulo en el ápice de 60° . La lectura de la penetración se realiza con la ayuda de una lupa, con una aproximación de 0.1 mm.

Cono Ruso

Vasilev, científico ruso, estandarizó la prueba del cono Ruso en 1949. Este dispositivo está conformado por un cono de cobre el cual tiene un ángulo en su ápice de 30° y pesos que suman 76 g. El recipiente cilíndrico donde se coloca la muestra de suelo tiene una profundidad de 20 mm y un diámetro de 37 mm. Este cono no cuenta con un brazo del cual se deje caer el cono, sino que se posiciona al ras de la superficie de la muestra y se

⁵ A W Skempton nació en Northampton, Inglaterra, en 1914. Estudió en la Northampton School y en el Imperial College de la Universidad de Londres donde se graduó con honores en 1935, y obtuvo el grado de Maestro en 1936. En 1949 se doctoró en el Imperial College. De 1936 a 1946 Skempton trabajó en la *Building Research Station*. En 1946 estableció la enseñanza de la mecánica de suelos en el Imperial College. Desde 1957 hasta 1961 fue presidente de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos y Cementaciones. En 1961 fue elegido miembro de la Royal Society y pronunció una de las conferencias *Roskilde*. Realizó investigaciones importantes sobre la historia de la ingeniería civil, mecánica de suelos, mecánica de rocas y geología, y contribuciones en los principios fundamentales de los esfuerzos efectivos, presiones intersticiales en arcillas, capacidad de carga y estabilidad de taludes. Bajo su dirección el Imperial College se ha convertido en un centro de investigación de punta en los estudios de la mecánica de suelos en el mundo.

deja penetrar libremente. El límite líquido es el correspondiente al contenido de agua cuando la penetración de cono sea de 10 mm.

Cono Indio

El Indian Central Road Research Institute desarrolló el cono Indio en 1953, con el fin de sustituir la prueba de la Copa de Casagrande, está conformado por un pedestal y un brazo vertical, del cual está sujetado el cono de un ángulo de 31° en el ápice, un peso de 148 g y una altura de 30 mm. El recipiente cilíndrico tiene una profundidad y diámetro de 50 mm. El cono se posiciona al ras de la superficie y se deja penetrar libremente; el límite líquido corresponde al contenido de agua cuando el cono penetra 254 mm (1 in).

Cono del Instituto Tecnológico de Georgia

Este cono fue desarrollado por el ITG para determinar el límite líquido en limos micáceos, en 1951. Este dispositivo está formado por un pedestal y un brazo vertical ajustable, el cono tiene una altura de 20 mm, un peso de 75 g y un ángulo de 30° en el ápice. El recipiente cilíndrico tiene una profundidad de 20 mm y 40 mm de diámetro. Se posiciona el cono al ras de la superficie de la muestra y se deja penetrar libremente; el límite líquido corresponde al contenido de agua cuando el cono penetra 10 mm.

Cono Inglés

Este cono fue desarrollado para estandarizar las pruebas que se realizaban con la Copa de Casagrande, ya que las pruebas están directamente determinadas por la apreciación del operador y su forma de operar la Copa Casagrande. Cuenta con un pedestal, un brazo vertical ajustable, un disco medidor y un cono el cual está sujeto por su eje al brazo y al disco medidor (ver figura 4.3, 4.4 y 4.9). El cono tiene un peso de 80 g (ver figura 4.10), una altura de 35 mm (ver figura 4.5), y un ángulo de 30° en el ápice (ver figura 4.6 y 4.11). El recipiente cilíndrico tiene una profundidad de 40 mm (ver figura 4.8) y un diámetro de 55 mm (ver figura 4.7). De igual forma se posiciona el cono al ras de la superficie y se deja caer libremente sobre la muestra. El límite líquido corresponde al contenido de agua cuando el cono penetra 20 mm. Este cono fue el que se utilizó para el desarrollo de las pruebas de laboratorio.

En cuadro 4.1 se muestran las principales características de los conos de manera comparativa

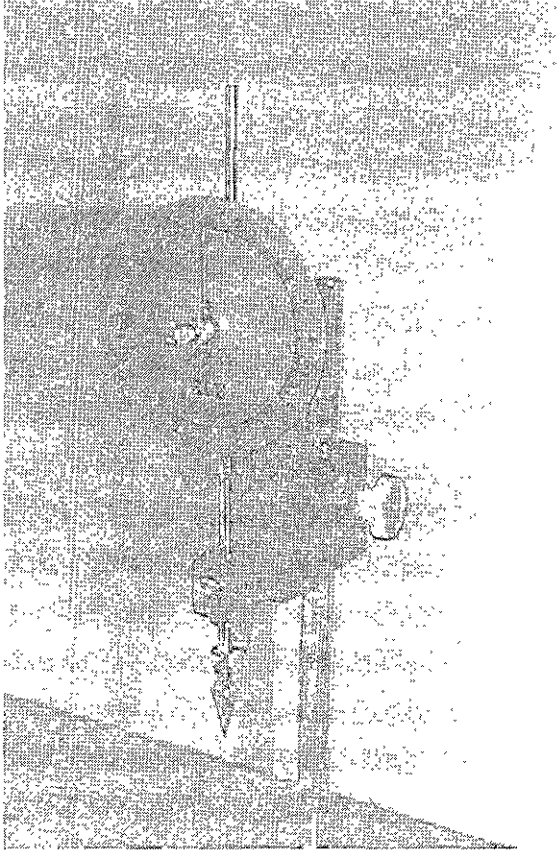


Figura 4.3 Cono Inglés mostrando el disco medidor y su punta.

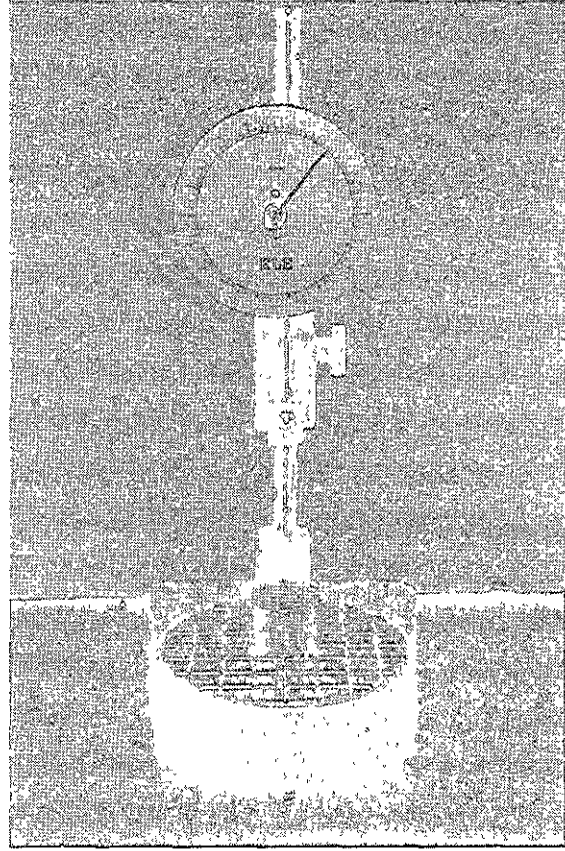


Figura 4.4 Cono Inglés completo

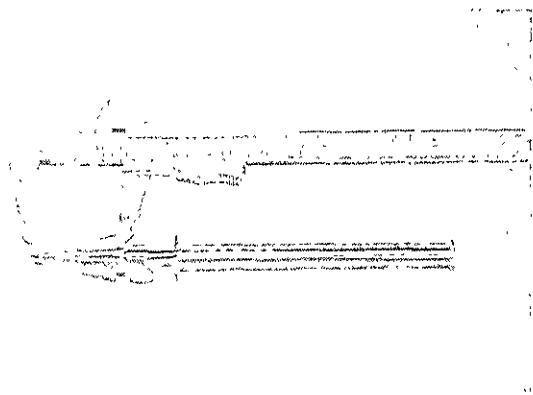


Figura 4.5 Vástago y punta del Cono Inglés con vernier

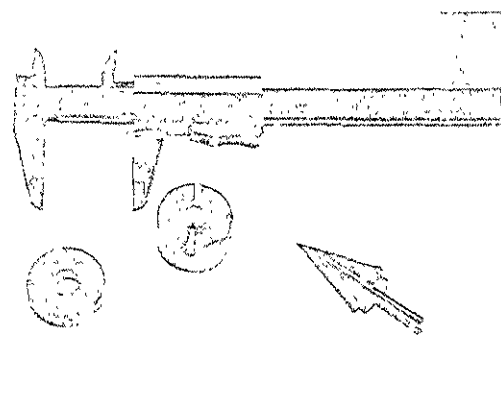


Figura 4.6 Punta y pesas para el Cono Inglés con vernier.

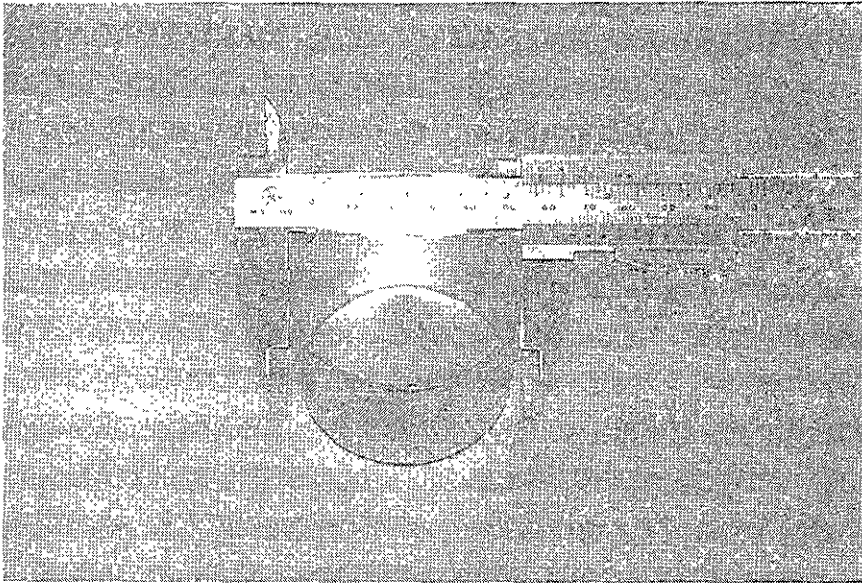


Figura 4.7 Recipiente cilíndrico para Cono Inglés con vernier, mostrando su diámetro.



Figura 4.8 Recipiente cilíndrico para Cono Inglés con vernier, mostrando su altura.

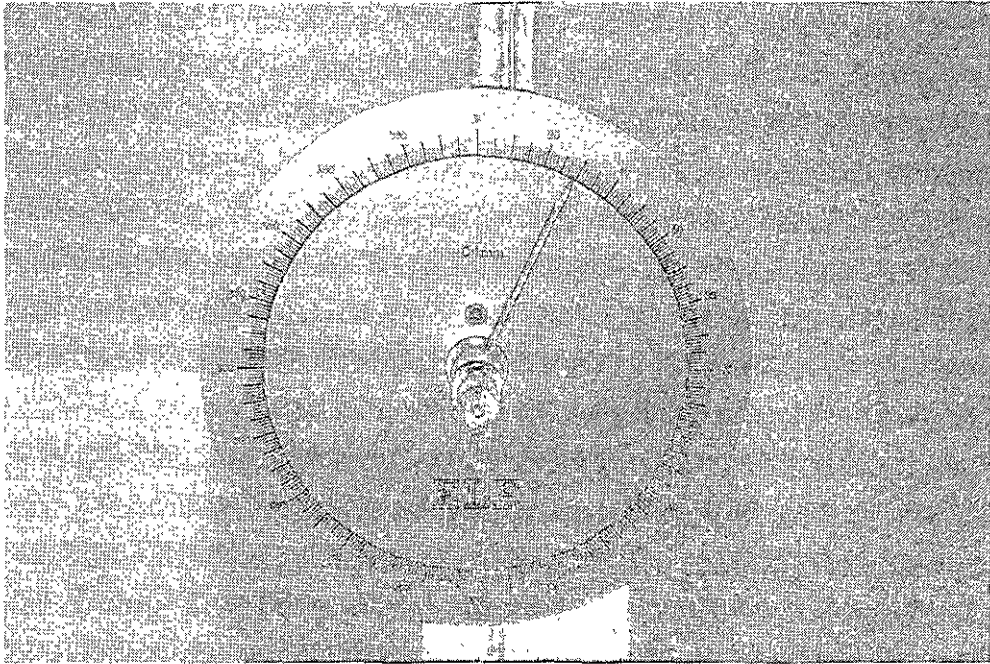


Figura 4.9 Disco medidor del Cono Inglés.

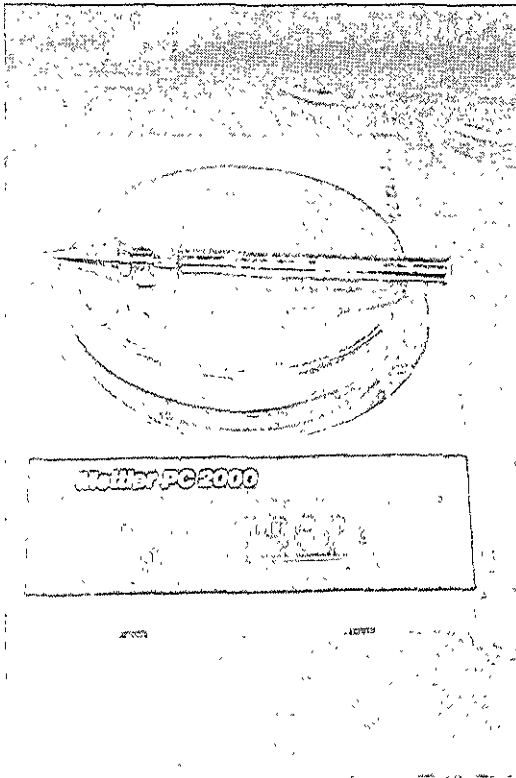


Figura 4.10 Peso del vástago y punta del Cono Inglés.

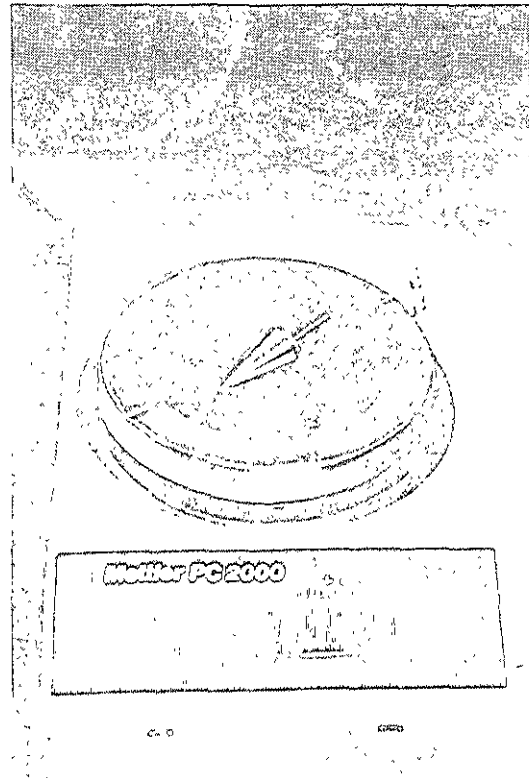


Figura 4.11 Peso de la punta del Cono Inglés.

Cono Sueco	60 g	60°
Cono Ruso	76 g	30°
Cono Indio	148 g	31°
Cono del Instituto Tecnológico de Georgia (ITG)	75 g	30°
Cono Inglés	80 g	30°

Cuadro 4.1 Tabla comparativa de las principales características de los conos

Límite Plástico

El Límite Plástico (LP) es un poco más rudimentario, porque requiere algo de práctica para obtener resultados consistentes y reproducibles; y se define por la humedad del suelo amasado cuando empieza a separarse y desmoronarse al enrollarse a mano para formar rollitos de 3 mm de diámetro (ver figura 4.12).



Figura 4.12 Dimensión del rollo para determinar el Límite Plástico

La formación de los rollitos se hace usualmente sobre una hoja de papel totalmente seca, para acelerar la pérdida de humedad del material; también es frecuente efectuar el rolado sobre una placa de vidrio. Cuando los rollitos llegan a los 3 mm, se doblan y presionan, formando una pastilla que vuelve a rolarse, hasta que en los 3 mm justos ocurra el desmoronamiento y agrietamiento, en tal momento se determinará rápidamente su contenido de agua que es el límite plástico.

Se han realizado varios intentos para poder utilizar algún aparato de acción mecánica en vez del rolado manual, sin obtener ningún resultado satisfactorio, ya que en dichas máquinas no se logra el ajuste a la tenacidad⁶ de los diferentes suelos, y en el rolado manual el operador lo ajusta automáticamente por medio del tacto.

Límite de Contracción

El Límite de Contracción (LC) se define por la humedad que contiene el suelo amasado cuando alcanza su volumen mínimo teórico al secarse, viniendo del estado de saturación. Esto es la frontera entre el estado sólido y semisólido. Este límite se observa por un característico cambio de tono oscuro a claro.

Atterberg propuso un método para la determinación del Límite de Contracción de un suelo, que consistía en la realización de mediciones frecuentes de la longitud y peso de un mismo prisma, hasta que ya no se observara ninguna disminución de la longitud. Terzaghi sugirió un método más simple para determinación del Límite de Contracción, que consiste en medir el peso y el volumen de una muestra de suelo totalmente seca, determinándose analíticamente como sigue:

$$LC = \omega_c = \omega_1 - \frac{(V_i - V_f)}{W_s} \times 100$$

donde

$LC = \omega_c$ = límite de contracción en %.

ω_1 = porcentaje de humedad del suelo antes de contraerse.

V_i = volumen inicial de la pastilla de suelo.

V_f = volumen final de la pastilla (suelo seco).

W_s = peso de sólidos.

IV. II Métodos para determinar los Límites de Consistencia

Límite Líquido

Técnica de la Copa de Casagrande

Debido a la necesidad de estandarizar los Límites de Atterberg, Arthur Casagrande (1932) desarrolla la Copa de Casagrande; siendo ésta la técnica que se ha difundido por todo el mundo y se le considera una prueba estándar. Este tipo de prueba es de corte dinámico, por lo cual es importante el tipo de material de la base y de la copa, el peso de la copa, el tipo de ranurador que se utilice y la altura de caída.

La Copa de Casagrande es un recipiente esférico de bronce o latón, que tiene un radio de 54 mm, un espesor de 2 mm y un peso de 200 ± 20 g (ver figura 4.13 y 4.14) incluyendo un tacón (del mismo material, ver figura 4.15); que gira junto con la copa en torno a un eje fijo unido a la base de caucho o micarta 221. Esta copa tiene una excentricidad que permite que la copa caiga y golpee contra la base. La altura de caída de la copa por especificación es 10 mm, medido desde el punto de la copa que toca la base al caer, hasta la base, cuando la copa esté en su punto más alto. La realización del ajuste se hace con un prisma metálico de 10 mm por lado que forma parte del dispositivo; este prisma se introduce entre la copa y la base, permitiendo que el punto de la copa que toca la base al caer quede en contacto con éste (ver figura 4.16 y 4.17). Las especificaciones y procedimiento para la Copa de Casagrande están bajo normas de la ASTM (ASTM D4318-00, ver Anexo)

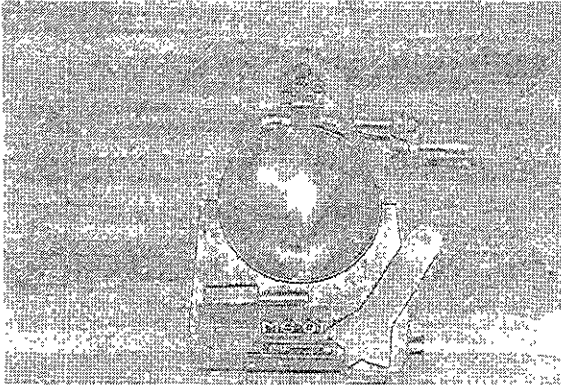


Figura 4.13 Copa de Casagrande acompañada del ranurador plástico y calibrador.

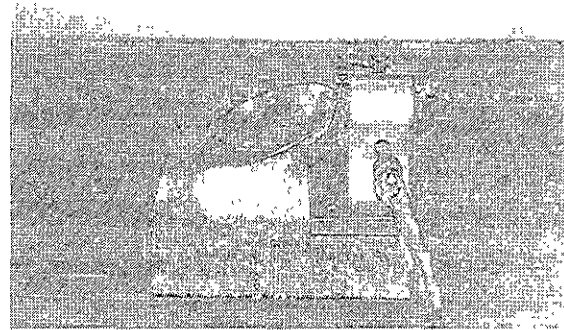


Figura 4.14 Copa de Casagrande vista lateralmente.

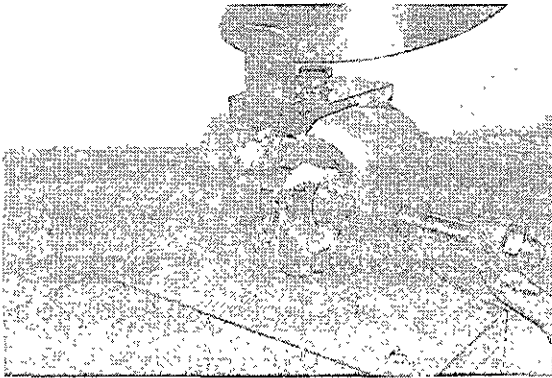


Figura 4.15 Copa de Casagrande, acercamiento de mecanismo de caída.

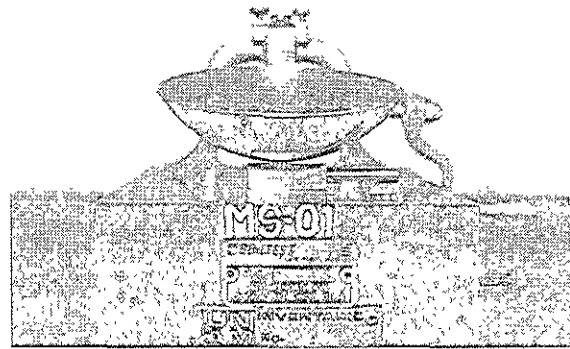


Figura 4.16 Copa de Casagrande vista de frente con calibrador.

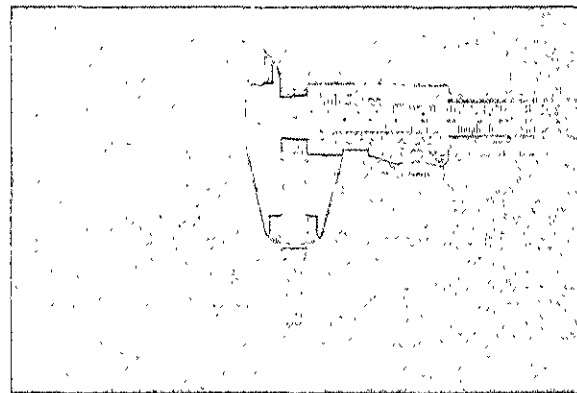


Figura 4.17 Calibrador de la Copa de Casagrande con vernier.

Existen dos tipos de ranuradores para la Copa de Casagrande, siendo estos el curvo con sección trapecial y el laminar. El primero no es muy recomendado ya que al introducir éste en el material no hay control en la altura del corte y hace una ranura desplazando el

material, provocando que la adherencia del material con la copa disminuya; y por consecuencia con una cantidad menor de golpes el suelo se desliza. El segundo es más recomendado, ya que éste quita material para formar la ranura, sin desplazarlo y la adherencia entre el material y la copa sigue constante en el material.

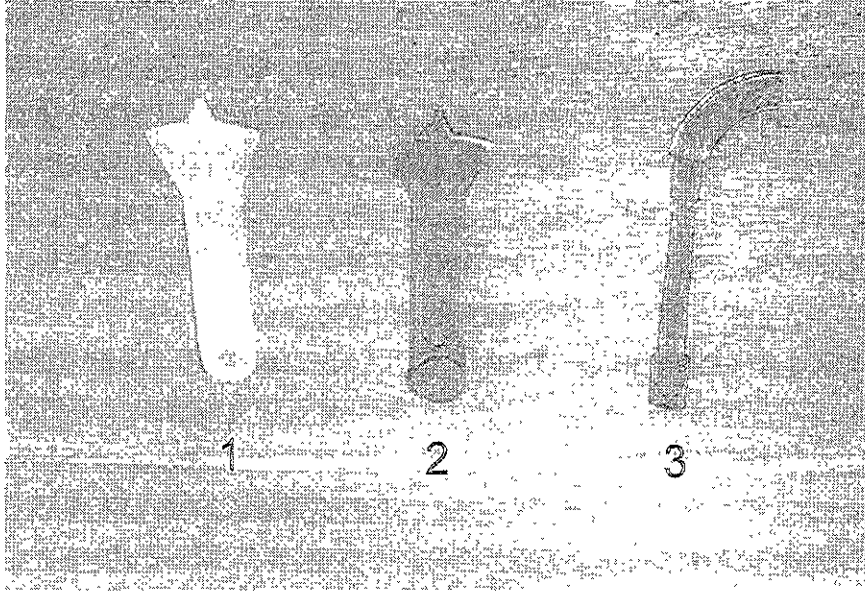


Figura 4.18 Ranuradores

1) Ranurador laminar plástico, 2) Ranurador laminar metálico, 3) Ranurador curvo con sección trapecial.

Para llegar a obtener resultados consistentes en la Copa de Casagrande, se requiere de experiencia al hacer el corte con el ranurador, y la velocidad para controlar la manivela; es por esto que antes de iniciar con estas pruebas se trabajó con un suelo para adquirir esa experiencia.

Material.

Copa Casagrande *
 Placa de Vidrio
 Ranurador Laminar *
 Vidrios de Reloj
 Espátula de cuchillo
 Espátula de abanico
 Horno Convencional (Temperatura constante de $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$)
 Báscula de precisión de 0.01 g
 Aspersor y/o piseta con agua destilada
 Muestras de suelo fino
 Franelas para limpiar
 Hoja con formato de registro

* Construcción bajo norma ASTM (Designación D4318-00, ver Anexo)

Es importante antes de comenzar a manipular una muestra, registrar los datos del suelo para llevar un orden sistemático en la investigación y laboratorio.

Procedimiento:

1. Colocar la Copa de Casagrande a su máxima altura de caída (ver figura 4.19), girando la manivela y ajustarla a 10 mm de la base. Para ajustar estos 10 mm se utiliza el calibrador que forma parte del dispositivo de Casagrande, el cual tiene una medida estándar de 10 mm (ver figura 4.20).

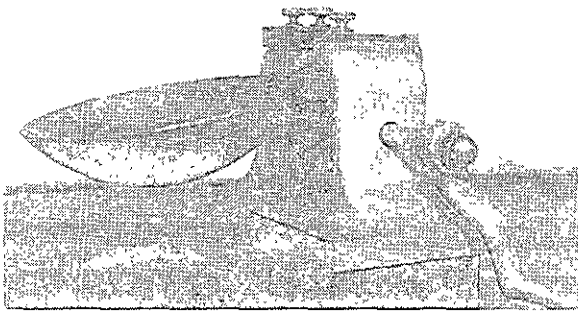


Figura 4.19 Copa de Casagrande, a su máxima altura de caída.

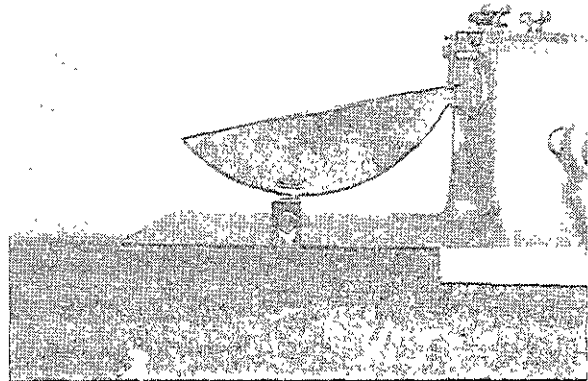


Figura 4.20 Copa de Casagrande, ajustada con el calibrador.

2. La muestra de suelo, se cierra con la malla del número 40, únicamente se trabaja con la muestra de material que haya pasado a través de la malla.
3. Una vez seleccionada la muestra, se le agrega pequeñas cantidades de agua destilada con el aspersor y/o piseta, hasta lograr que la muestra presente una consistencia espesa y uniforme, ayudándose con las espátulas (ver figura 4.21).

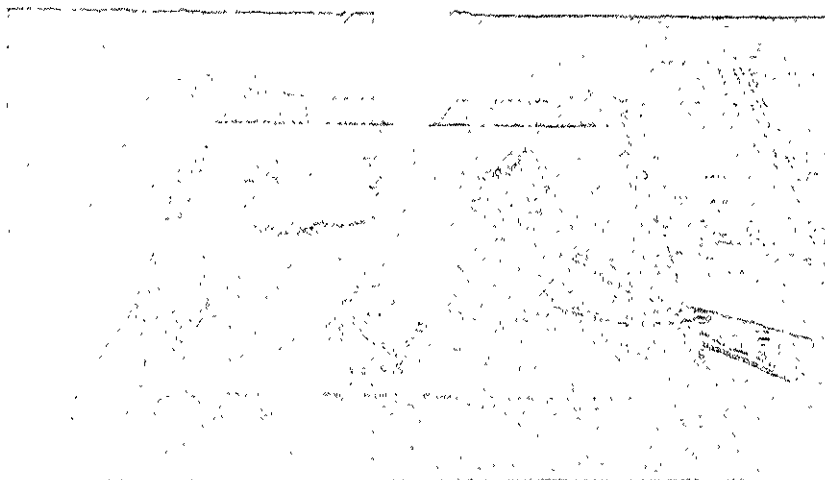


Figura 4.21 Suelo con diferentes cantidades de agua.

4. Con ayuda de la espátula de cuchillo se coloca muestra de suelo en la Copa Casagrande, dejando un espesor máximo de un 8 mm / 10 mm, asegurándonos de que la superficie quede lisa (ver figura 4.22 y 4.23).

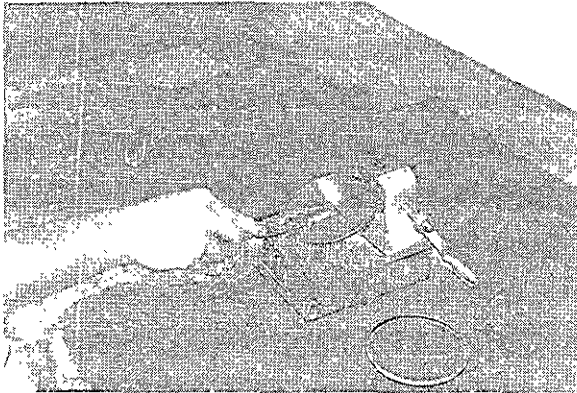


Figura 4.22 Copa de Casagrande, colocando material con espátula.

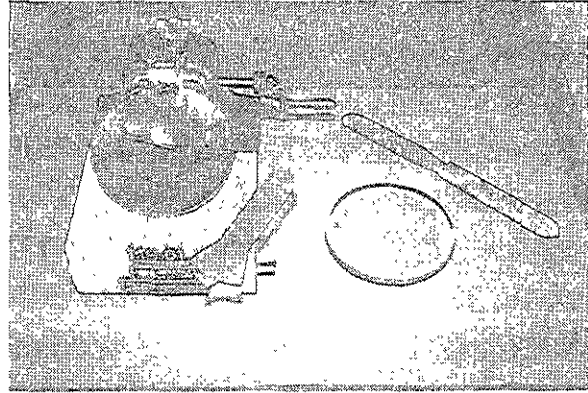


Figura 4.23 Copa de Casagrande, con material aplicado.

- 5 Usando el ranurador laminar se hará una incisión a lo largo, por el centro de la copa, como se muestra en la figura 4.24.

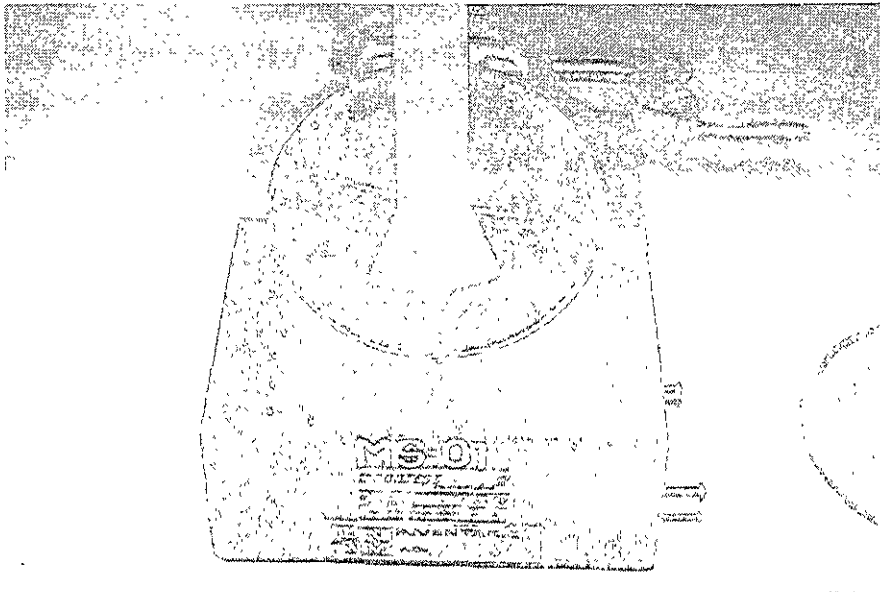


Figura 4.24 Copa de Casagrande, con material ranurado.

- 6 Se hace girar la manivela de la Copa de Casagrande, con una frecuencia de 2 golpes por segundo, hasta lograr que cierre la ranura $\frac{1}{2}$ pulgada (ver figura 4.25). En ese momento se deja de girar la manivela y se contabiliza el número de golpes que se realizaron. si la muestra queda entre 25 y 35 golpes, está dentro del rango si solo se va a obtener un solo punto en la gráfica, en caso contrario se debe agregar un poco más de agua a la muestra para poder obtener más puntos. Es

necesario corroborar la cantidad de golpes 2 veces más, y cuidar que la diferencia entre el número de golpes no sea mayor de ± 1 golpe.

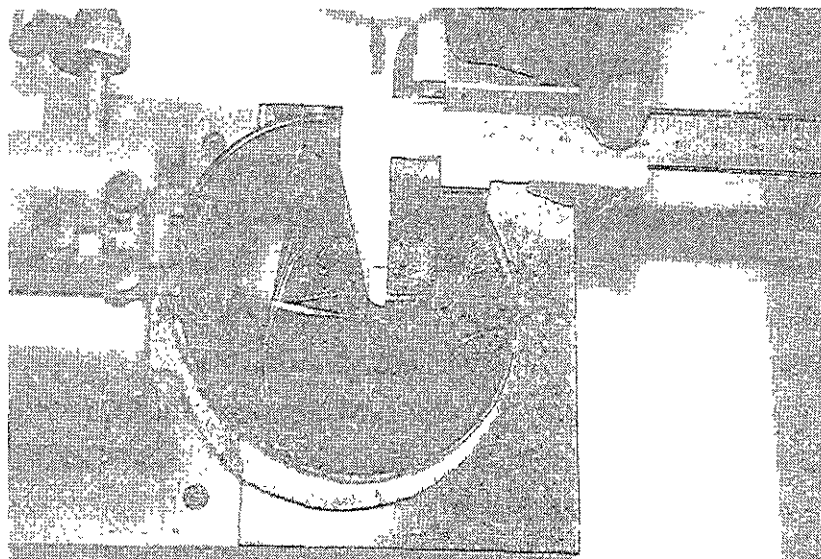


Figura 4.25 Copa de Casagrande, con ranura cerrada.

7. Se pesa el vidrio de reloj y con la espátula de cuchillo se extrae una muestra del material (ver figura 4.26), dicha muestra debe ser extraída de la parte en la cual la incisión quedó cerrada y se coloca en el vidrio de reloj (ver figura 4.27).

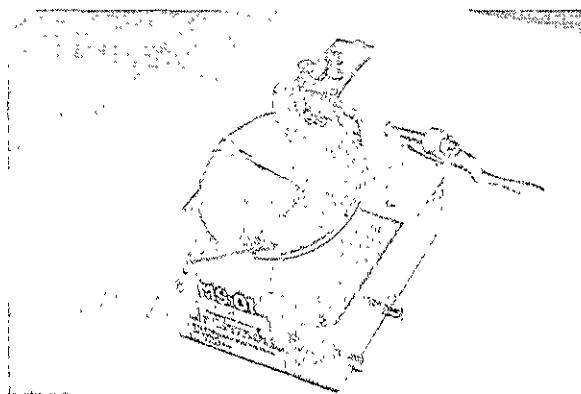


Figura 4.26 Copa de Casagrande, extrayendo material con espátula.

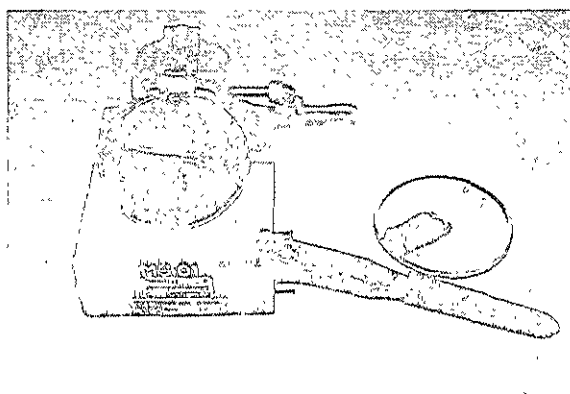


Figura 4.27 Muestra de material colocado en vidrio de reloj.

8. Se pesa el vidrio de reloj con la muestra, se registran los datos y se introduce al horno convencional por 24 horas (ver figura 4.28).



Figura 4.28 Muestra de material pesada

9. Esta operación se realiza otra vez del paso 3 al 8, modificando la cantidad de agua en la mezcla. Con el fin de que la incisión cierre dentro de diferentes intervalos de acuerdo al número de puntos que se deseen determinar, y a la experiencia del operador.
10. Concluyendo las 24 horas, se extrae la muestra, se enfría, se pesa y se registran los datos.
11. Para obtener el contenido de agua se utiliza la siguiente expresión

$$\omega(\%) = \frac{W_{cap+sh} - W_{cap+ss}}{W_{cap+ss} - W_{cap}} \times 100$$

ω = Contenido de agua (%)

W_{cap+sh} = Peso de vidrio de reloj más suelo húmedo

W_{cap+ss} = Peso del vidrio de reloj más suelo seco

W_{cap} = Peso del vidrio de reloj

Técnica del Cono Inglés

Esta es una técnica alternativa para el cálculo de Límite Líquido, como antes se mencionó. Las especificaciones y procedimiento para la Técnica del Cono Inglés están bajo la norma BS 1377: Part 2. 1990 (ver Anexo).

Equipo

Cono Inglés *

Placa de vidrio

- Vidrios de Reloj
- Espátula de cuchillo
- Espátula de abanico
- Horno Convencional (Temperatura constante de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$)
- Recipiente cilíndrico para Cono Inglés
- Báscula de precisión de 0.01 g
- Aspersor y/o piseta con agua destilada
- Muestras de suelo fino
- Franelas para limpiar
- Hoja con formato de registro
- * Construcción bajo norma BS (Designación BS 1377, Part 2: 1990)

Procedimiento.

1. Se utilizan aproximadamente 400 g de material por prueba, que previamente se pasa por la malla No. 40 (0.425 mm).
2. El material se coloca sobre la placa de vidrio, donde se le agrega poco a poco agua destilada con el aspersor y/o piseta hasta hacer una mezcla homogénea con ayuda de las espátulas (ver figura 4.21).
3. Con ayuda de la espátula de cuchillo se coloca parte de la muestra en el recipiente cilíndrico hasta que queda al ras, evitando la entrada de aire.

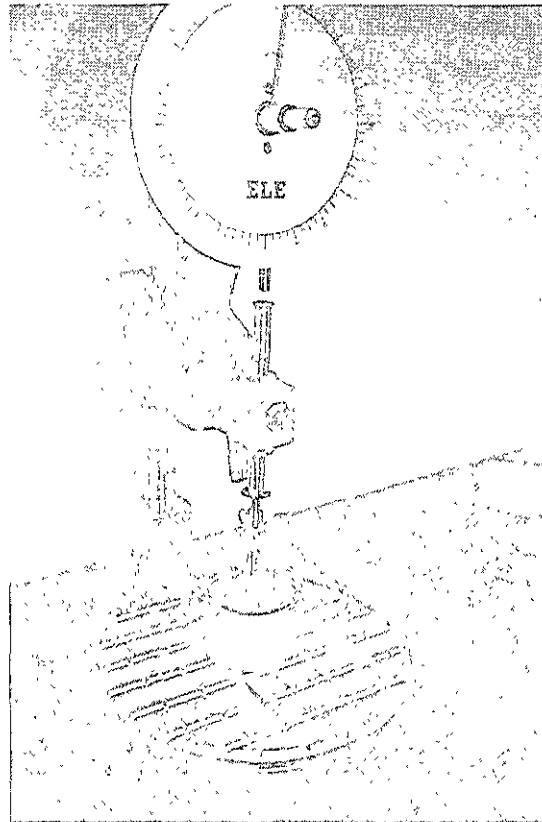


Figura 4 29 Cono Inglés con recipiente cilíndrico.

4. El recipiente cilíndrico se pone en el aparato, asegurando que el ápice del cono toque justamente la superficie del suelo (posición inicial), esto se hace bajando el disco medidor (ver figura 4.30 y 4.31). Cuando el cono está en la posición inicial con solo un movimiento ligero es suficiente para marcar el suelo.

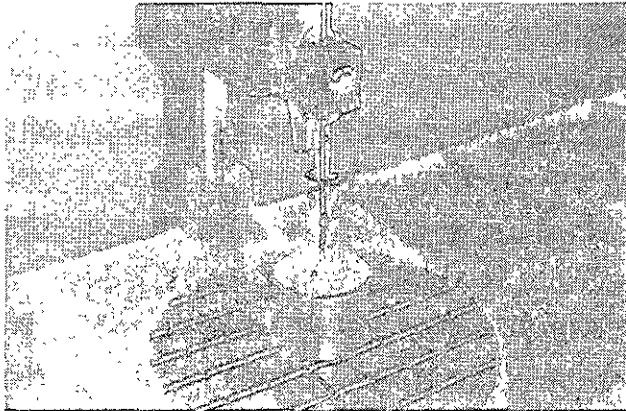


Figura 4.30 Ápice tocando el ras del suelo (superior).

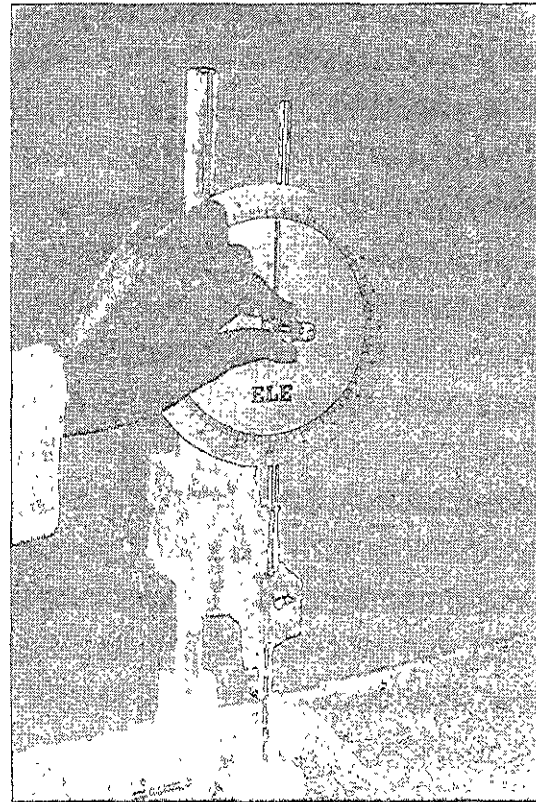


Figura 4.31 Ajuste a posición cero del disco medidor (derecha).

5. Se mantuvo apretado el disparador por un periodo de 5 ± 1 s, cuidando de no sacudir el aparato durante la operación (ver figura 4.32). Después, se bajó el disco medidor hasta hacer contacto con el cono, y obtuvo la lectura en el disco medidor (ver figura 4.33, 4.34, 4.35, 4.36, 4.37 y 4.38).



Figura 4.32 Disparador accionado

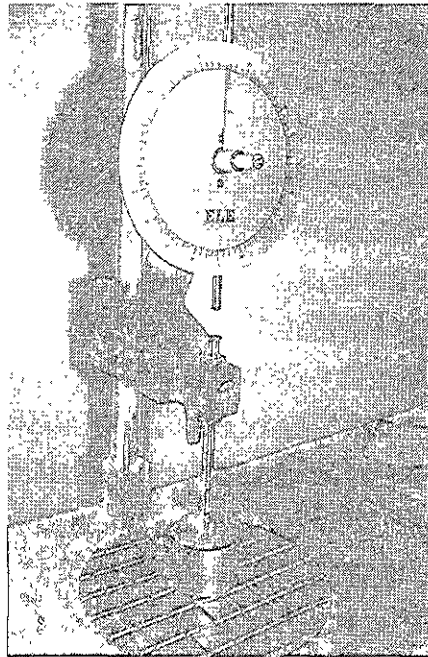


Figura 4.33 Cono inglés con punta en la muestra.

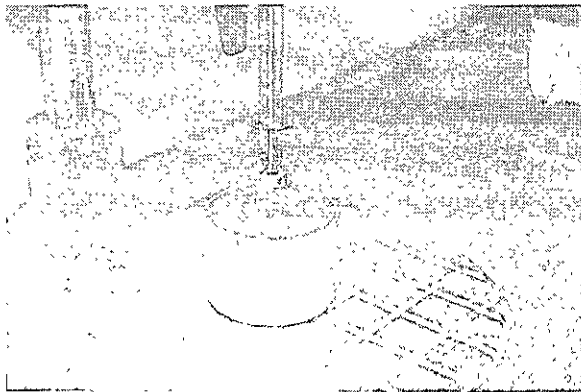


Figura 4.34 Punta en el material.

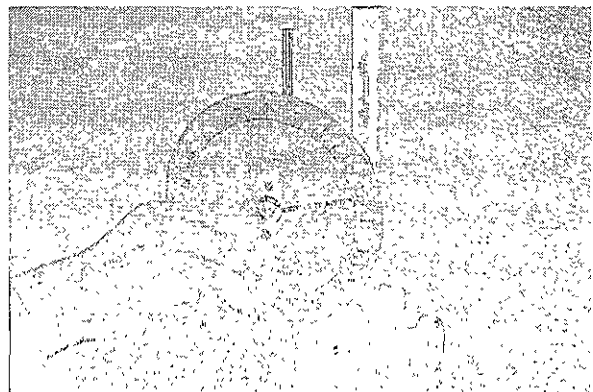


Figura 4.35 Girando perilla (nótese que el eje no ha tocado el vástago).



Figura 4.36 Girando perilla (acercándose el eje al vástago)

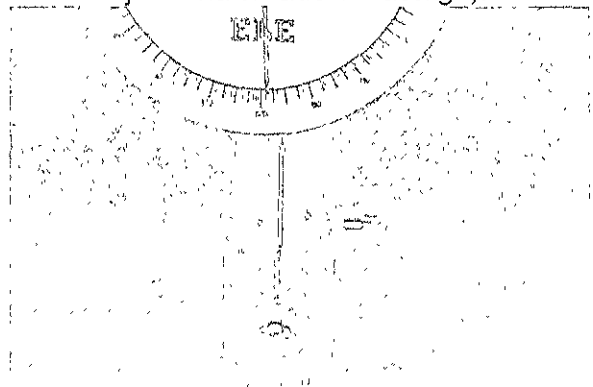


Figura 4.37 Tomando lectura (nótese que el eje y el vástago han quedado unidos)

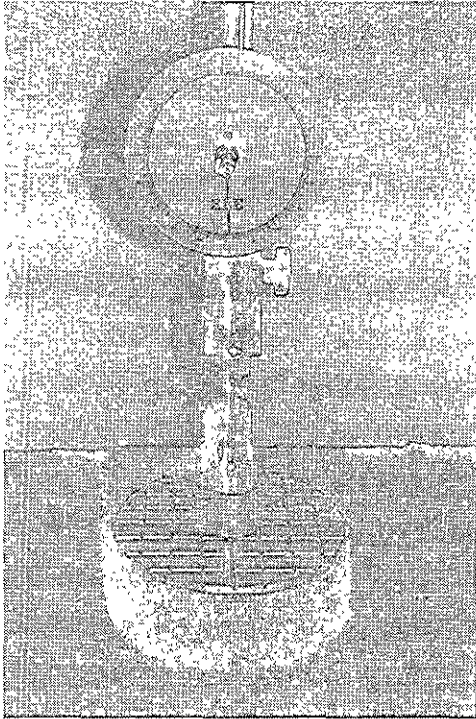


Figura 4.38 Vista del Cono Inglés con lectura.

6. Apretando el disparador se levanta y limpia el cono, de manera cuidadosa para evitar su ralladura (ver figura 4.39).



Figura 4.39 Elevación de la punta del Cono Inglés

7. Se toma parte de la muestra del recipiente cilíndrico con ayuda de la espátula de cuchillo, en la zona donde el cono penetró y se coloca en un vidrio de reloj previamente pesado, para determinar el contenido de agua (ver figura 4.40, 4.41)

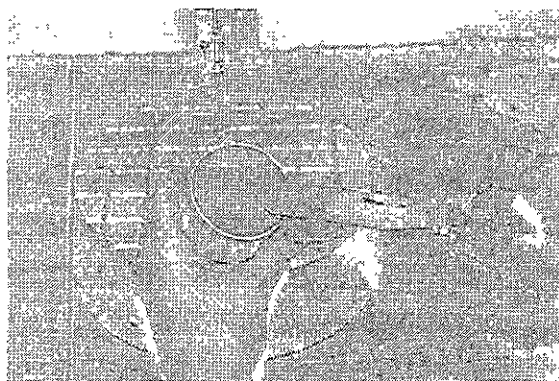


Figura 4.40 Sujetando recipiente cilíndrico para la extracción de muestra.



Figura 4.41 Extrayendo muestra del recipiente cilíndrico.

8. El material restante del recipiente cilíndrico se regresa al vidrio, con el fin de homogeneizar nuevamente el material, se agrega un poco de agua o en caso contrario se seca el material por el remoldeo con las espátulas⁷. Se repiten los puntos 3 al 8, hasta contar de 10 a 15 muestras.
9. Los vidrios de reloj con las muestras ya pesadas, se introducen en el horno convencional a una temperatura de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas. Después de transcurrido ese tiempo, las muestras se saca del horno y se dejan enfriar hasta que los vidrios de reloj alcancen la temperatura ambiente para poder pesarlos. Con los pesos obtenidos, se calcula el contenido de agua.
10. Con los contenidos de agua obtenidos y su respectiva penetración se construye la gráfica; donde, en escala natural en el eje de las abscisas corresponde a la penetración del cono en mm, y en el eje de las ordenadas, también en escala natural el contenido de agua en porcentaje.
11. Se traza una línea sobre la gráfica, la cual pasa por la mayoría de los puntos. El punto obtenido en la intersección de la penetración del cono en 20 mm; corresponde al Límite Líquido del material estudiado.

Límite Plástico

Las especificaciones y procedimiento para la obtención del Límite Plástico están bajo normas de la ASTM (ASTM D4318-00, ver Anexo).

Equipo

Placa de vidrio
 Espátula de cuchillo
 Espátula de abanico
 Aspersion y/o piseta con agua destilada
 Vidrios de reloj
 Báscula de precisión de 0.01 g

⁷ Se emplea la mayor cantidad de agua mayor a la del cono.

Horno Convencional (Temperatura constante de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$)

Muestras de suelo fino

Franelas para limpiar

Hoja con formato de registro

Procedimiento:

1. Se utilizan aproximadamente 20 g de material por prueba, que previamente pasa por la malla No. 40 (0.425 mm).
2. El material se coloca sobre la placa de vidrio, donde se le agrega una pequeña cantidad de agua para formar una mezcla homogénea con ayuda de las espátulas (ver figura 4.21).
3. Con esta mezcla se forma un rollo con la palma de la mano y la superficie plana del vidrio, hasta obtener un diámetro aproximado de 3 mm (ver figura 4.42). Luego al rollo se le transforma en pelota, para que de esta manera pierda agua; hasta que el rollo se observe quebradizo y se agriete (ver figura 4.43).

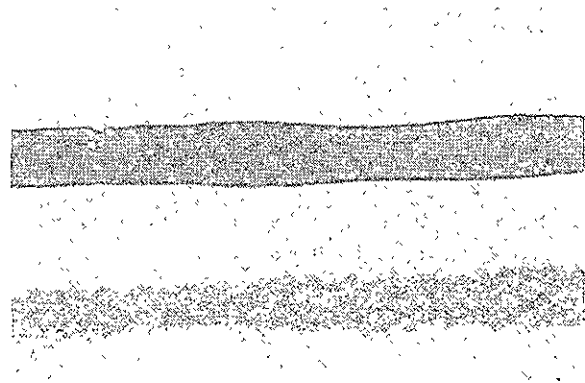


Figura 4.42 Haciendo rollo el material

Figura 4.43 Rollo quebradizo y agrietado

4. En el momento en que el rollo se observa quebradizo y agrietado, éste se coloca sobre el vidrio de reloj previamente pesado (limpio y libre de humedad) para determinar su contenido de agua. Una vez colocado el rollo en el vidrio de reloj se procede a pesarlo, cuidando de evitar la evaporación por la temperatura ambiente.
5. Los vidrios de reloj con los rollos ya pesados se introducen al horno convencional por un tiempo de 24 horas y a una temperatura de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Después de transcurrido ese tiempo, los rollos se sacaron del horno y se dejaron enfriar, hasta que el vidrio de reloj alcanzó la temperatura ambiente para poder pesarlos. Con los valores de los pesos obtenidos, se obtiene su contenido de agua, utilizando la siguiente ecuación.

$$w(\%) = \frac{W_w}{W_s} = \frac{W_{cap+sh} - W_{cap+sv}}{W_{cap+sv} - W_{cap}} \times 100$$

donde:

w = contenido de agua

w_w = peso del agua

w_s = peso de sólidos

w_{cap+sh} = peso de la cápsula (o vidrio de reloj) más el suelo húmedo

w_{cap+ss} = peso de la cápsula (o vidrio de reloj) más el suelo seco

w_{cap} = peso de la cápsula (o vidrio de reloj)

6. El promedio de estos contenidos de agua, es el límite plástico.

Límite de Contracción

Para ejemplificar la obtención del Límite de Contracción en esta investigación, se realizaron dos Límites de Contracción con suelos diferentes a los utilizados en esta investigación (debido a que todavía no se adquirían estos). El objetivo de la obtención de éstos es la ilustración de este método.

Equipo:

A continuación se presenta parte del equipo para la obtención del Límite de Contracción, ver figura 4.44.

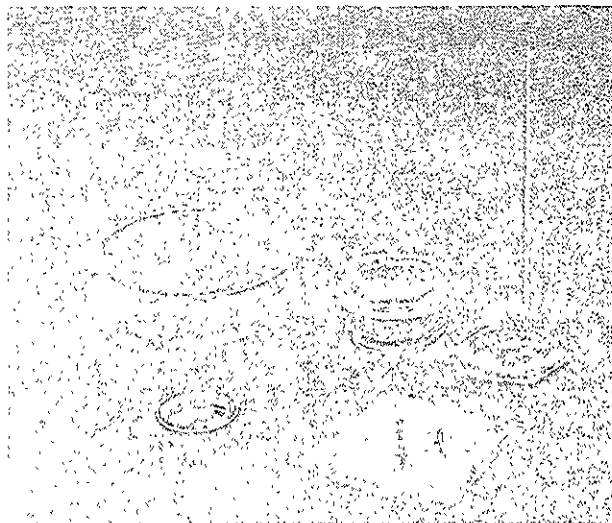


Figura 4.44 Parte del equipo para determinar Límite de Contracción.

Placa de vidrio

Aspersor y/o piseta con agua destilada

Plato de contracción (Monel)

Plato de contracción de púas

Cilindro graduado de 25 ml

Cápsula de evaporación

Espátula de cuchillo
Báscula de precisión de 0.01 g
Mercurio
Muestras de suelo fino
Franelas para limpiar
Hoja con formato de registro

Procedimiento:

1. Se utilizan aproximadamente 200 g de material por prueba, que previamente se pasa por la malla No. 40 (0.425 mm).
2. El material se coloca sobre la placa de vidrio, donde se le agrega una pequeña cantidad de agua para formar una mezcla homogénea con ayuda de las espátulas, dicha mezcla tiene un contenido de agua cercano al límite líquido. Se puede verificar con la Copa de Casagrande con un rango de 25 ± 1 golpes (ver figura 4.21).
3. Se llena la cápsula de evaporación con la muestra de material, golpeando la cápsula de evaporación para sacar posibles burbujas de aire.
4. Una vez llena la cápsula de evaporación garantizando que no existan burbujas de aire, se engrasa utilizando una espátula de cuchillo, y se limpia perfectamente.
5. Se pesa la cápsula con el material, anotando el dato.
6. Se pone a secar el material depositado en la cápsula, un lapso de varios días al medio ambiente.
7. Una vez cumplido este lapso se pesa nuevamente el material, anotando el dato varias veces al día.
8. Cuando se tiene cierta consistencia el material se sumergirá en mercurio, para hacer esto es necesaria la colocación del mercurio en el plato de contracción (Monel).
9. Se engrasa con el plato de contracción de púas, cayendo el excedente de mercurio en un recipiente y se limpia perfectamente el plato de contracción (Monel).
10. Se coge la muestra de material del Petri y se sumerge en el plato de contracción (Monel), con ayuda del plato de contracción de púas.
11. Los pasos 8, 9 y 10 se repiten hasta lograr un volumen constante.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los Límites de Contracción realizados. En el cuadro 4.2 y 4.4 se presentan las hojas de registro de datos que se obtuvieron, y en los cuadros 4.3 y 4.5 se presentan las gráficas del contenido de agua contra el volumen de la muestra de estas pruebas. Se observa en el cuadro 4.3, que el Límite de Contracción es de 75 % aproximadamente para la muestra 1, y el cuadro 4.5 es de 75 % aproximadamente para la muestra 2.

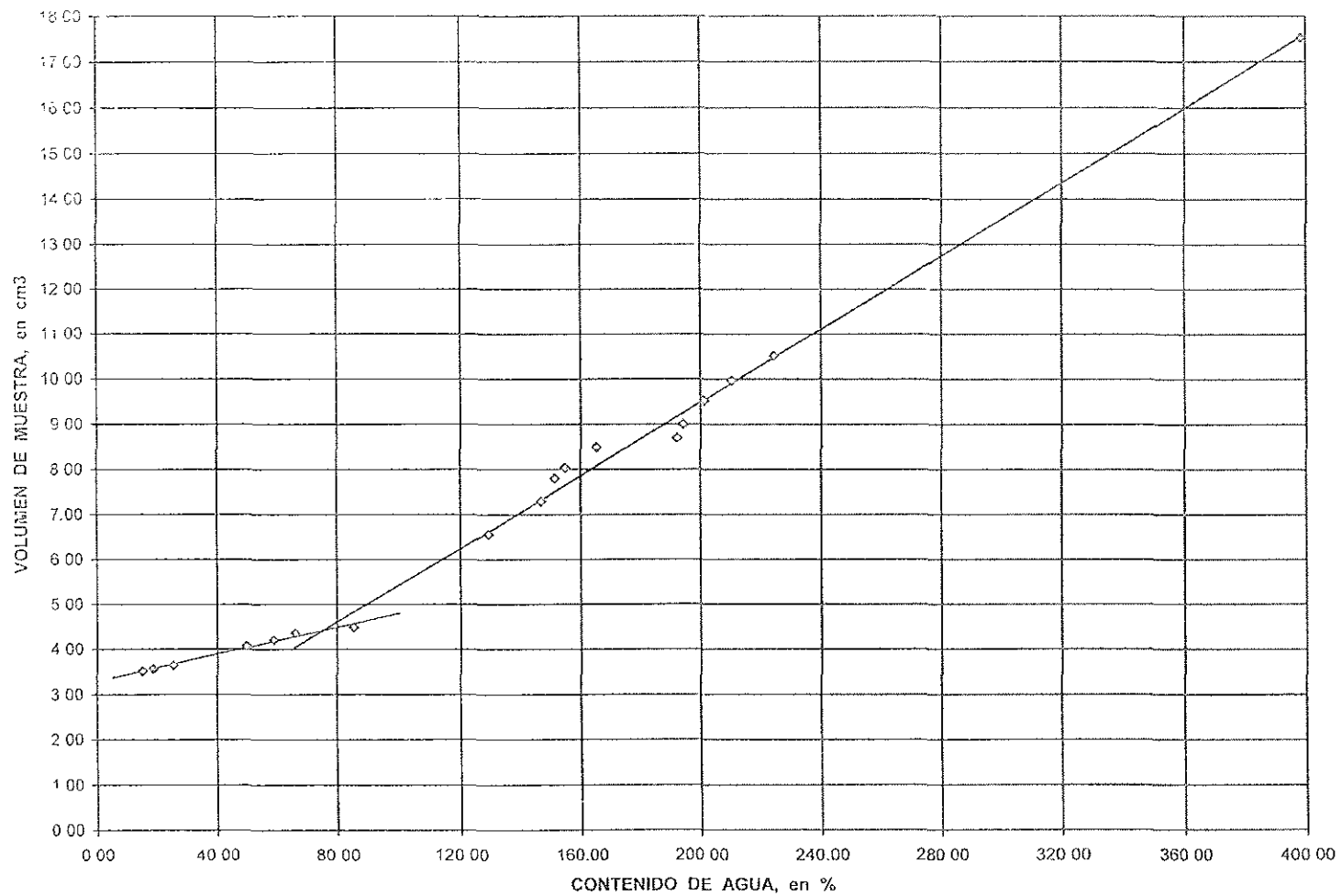
PRUEBA DE LÍMITE DE CONTRACCION
HOJA DE REGISTRO DE DATOS

MOLDE No E-2
 D = 3.452 cm
 " - 1.872 cm
 Va = 17.5201 cm³
 Wv+a = 24.11 gr
 Wv+a+sh = 44.00 gr

FECHA D/M/Y	HORA hh:mm:ss	TIEMPO hrs	Wv+a+sh gr	Wsh gr	Wss gr	Ww gr	ω %	W _{Hg} gr	Vm cm ³
18-Sep-00	11 00 00	0	44.00	19.89	3.99	15.90	398.4962		17.5201
	14 00 00	3	42.12	18.01		14.02	351.3784		
	18 00 00	7	39.77	15.66		11.67	292.4812		
19-Sep-00	07 00 00	20	38.00	13.89		9.90	248.1203		
	12 00 00	25	37.47	13.36		9.37	234.8371		
	14 00 00	27	37.06	12.95		8.96	224.5614	143.04	10.5176
	16 30 00	29.5	36.50	12.39		8.40	210.5263	135.56	9.9676
	19 00 00	32	36.13	12.02		8.03	201.2531	129.45	9.5184
	20 30 00	33.5	35.85	11.74		7.75	194.2356	122.31	8.9934
	21 30 00	34.5	35.77	11.66		7.67	192.2306	118.23	8.6934
20-Sep-00	07 30.00	44.5	34.69	10.58		6.59	165.1629	115.46	8.4897
	10 00 00	47	34.28	10.17		6.18	154.8872	109.35	8.0404
	11 00 00	48	34.14	10.03		6.04	151.3784	106.08	7.8000
	14 30 00	51.5	33.96	9.85		5.86	146.8672	99.28	7.3000
	19 30 00	56.5	33.26	9.15		5.16	129.3233	89.31	6.5669
	07.30.00	68.5	31.51	7.40		3.41	85.4637	61.08	4.4912
21-Sep-00	14 00 00	75	30.74	6.63		2.64	66.1654	59.35	4.3640
	16 00 00	77	30.46	6.35		2.36	59.1479	57.26	4.2103
	19 00 00	80	30.09	5.98		1.99	49.8747	55.44	4.0765
	07 30 00	92.5	29.11	5.00		1.01	25.3133	49.50	3.6400
22-Sep-00	12 00 00	97	28.84	4.73		0.74	18.5464	48.54	3.5690
	15 00 00	100	28.70	4.59		0.60	15.0376	47.78	3.5134

Cuadro 4.2 Hoja de registro de datos de muestra 1

LÍMITE DE CONTRACCIÓN MOLDE: E-2



Cuadro 4.3 Límite de Contracción de muestra 1

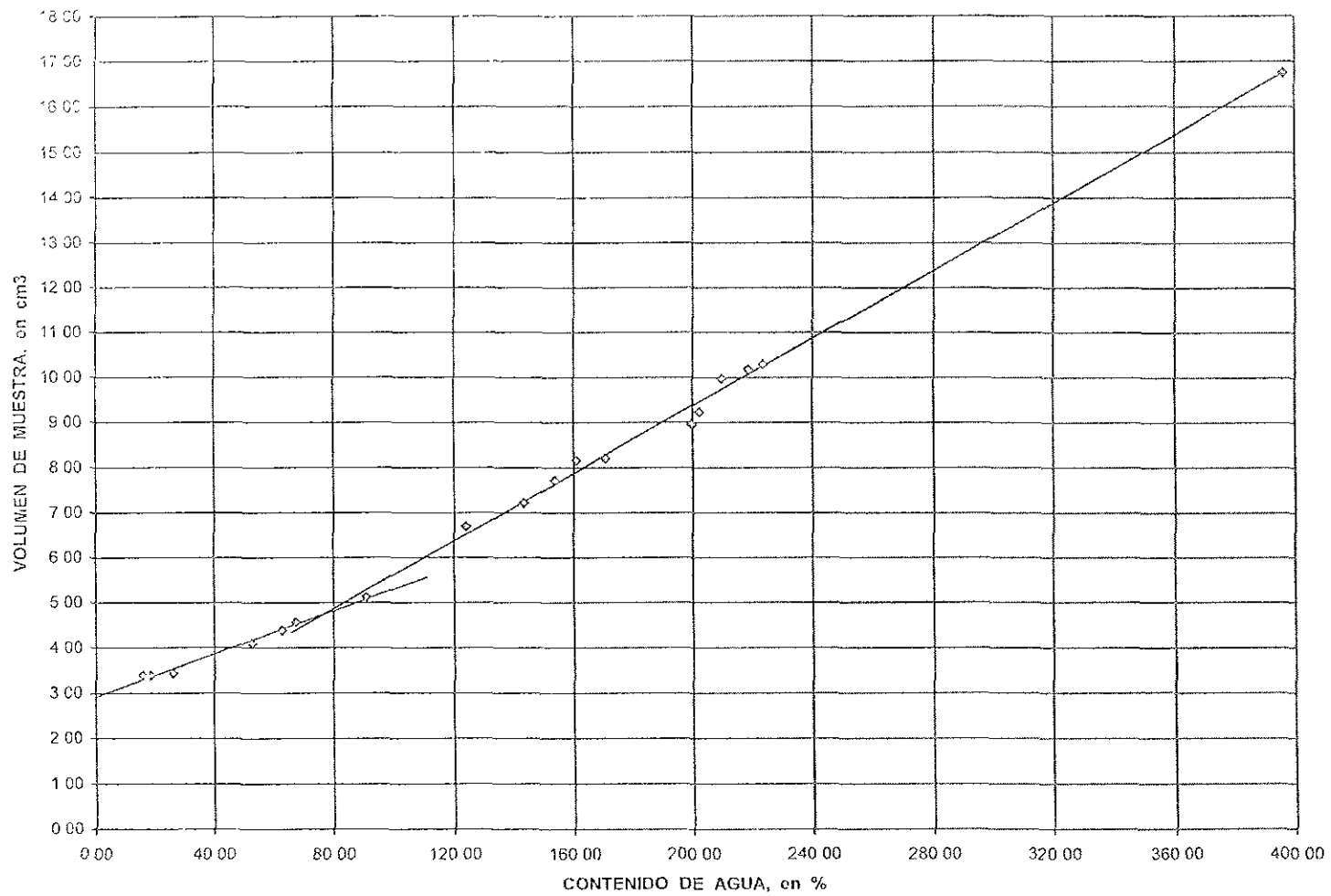
PRUEBA DE LIMITE DE CONTRACCIÓN
HOJA DE REGISTRO DE DATOS

MOLDE No E-8
 D = 3 443 cm
 h = 1 800 cm
 Va = 16 7537 cm³
 Wv+a = 23 29 gr
 Wv+a+sn = 42 34 gr

FECHA D/M/Y	HORA hh:mm:ss	TIEMPO hrs	Wv+a+sh gr	Wsh gr	Wss gr	Ww gr	ω %	W _{Hg} gr	Vm cm ³	
18-Sep-00	11 00 00	0	42 34	19 05	3.84	15.21	396 0938		16 7537	
	14 00 00	3	40 74	17 45		13.61	354 4271			
	18 00 00	7	38 57	15.28		11 44	297 9167			
19-Sep-00	07 00 00	20	36 80	13 51	9.67	251 8229	140 08	10 3000		
	12:00 00	25	36 28	12 99	9.15	238.2813				
	14 00 00	27	35 71	12.42	8 58	223 4375				
	16 30 00	29 5	35.52	12.23	8.39	218.4896			138.45	10 1801
	19 00 00	32	35 18	11 89	8.05	209.6354			135 67	9 9757
	20:30:00	33 5	34.90	11.61	7.77	202 3438			125 56	9 2324
20-Sep-00	21 30 00	34 5	34.80	11 51	7 67	199.7396	121 82	8 9574		
	07 30:00	44 5	33.69	10 40	6.56	170 8333	111 52	8 2000		
	10 00:00	47	33 31	10 02	6.18	160.9375	110 97	8.1596		
	11 00 00	48	33.03	9 74	5.90	153 6458	105 00	7 7206		
	14 30 00	51 5	32 63	9 34	5 50	143 2292	98.06	7 2100		
	19:30 00	56 5	31 89	8 60	4 76	123 9583	91.12	6 7000		
21-Sep-00	07:30 00	68,5	30 62	7 33	3 49	90.8854	69.63	5 1199		
	14 00 00	75	29 72	6 43	2.59	67 4479	62.02	4.5603		
	16:00:00	77	29 54	6 25	2 41	62 7604	59.57	4 3801		
	19:00:00	80	29.15	5 86	2.02	52 6042	55.63	4 0904		
22-Sep-00	07 30:00	92 5	28 13	4 84	1.00	26 0417	46.65	3 4301		
	12 00:00	97	27 84	4 55	0.71	18 4896	46.10	3 3897		
	15 00 00	100	27 74	4 45	0.61	15 8854	46 09	3 3890		

Cuadro 4.4 Hoja de registro de datos de muestra 2

LÍMITE DE CONTRACCIÓN MOLDE: E-8



Cuadro 4.5 Límite de Contracción de muestra 2

IV.III. Métodos de Secado

Existen diferentes técnicas de secado de suelo, la aplicación de éstas depende del tiempo en que se quiera obtener los resultados. Por ejemplo, el Horno de Convección nos puede proporcionar información a partir de 16 horas, dependiendo del tipo de material y cantidad, en cambio el Horno de Microondas nos da la oportunidad de obtener resultados el mismo día; siendo estos métodos de secado los de principal uso en los laboratorios de Mecánica de Suelos.

Actualmente existen varios métodos de secado, ya que ha sido necesario innovar técnicas para el trabajo en campo, con las características de rapidez, confiabilidad y economía. Algunos de estos métodos serán descritos a continuación.

Horno de Convección

La ASTM (American Society for Testing and Material) ha estandarizado este método (ASTM D2216-98, ver Anexo). Para secar un suelo por este método es necesario que el suelo permanezca en el horno a una temperatura de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ un tiempo que puede ser de 16 horas en adelante dependiendo del tipo de material a secar y cantidad.

Este método como ya se mencionó es el más utilizado y sirve para referencia con otro método de secado.

Equipo:

Horno Convencional (Temperatura constante de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$)

Báscula de precisión de 0.01 g

Recipientes cerámicos (cocidos a alta temperatura), refractarios y/o metálicos que sean resistentes a la corrosión, al cambio de peso por calentamiento y al enfriamiento

Desecador

Pinzas

Guantes

Hoja con formato de registro

Procedimiento.

- 1 Determinar el peso del recipiente limpio y seco en el cual se colocará el material húmedo, previamente identificado.

PRUEBA	CAPSULA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO HÚMEDO	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA (w) %
N°	N°	g	g	g	g	g	
1	A-4	118.03					

- 2 Colocar el material húmedo que se necesitará en la prueba en el recipiente seleccionado. Pesarse el recipiente con el suelo húmedo

Límites de Consistencia (Atterberg)

PRUEBA	CÁPSULA	PESO DE LA CÁPSULA	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO HÚMEDO	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA (ω)
N°	N°	g	g	g	g	g	%
1	A-4	118 03	216 04				

3. Introducir el recipiente con el material húmedo al horno y dejar pasar el tiempo necesario hasta que su peso no cambie (recordar que esto depende del tipo de suelo y cantidad de material).
4. Cuando el peso sea constante el material se extraerá del horno utilizando guantes y/o pinzas, y se colocara en el desecador donde el recipiente y material alcancen temperatura ambiente.
5. La muestra se pesa obteniendo el peso del recipiente con suelo seco.

PRUEBA	CÁPSULA	PESO DE LA CÁPSULA	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO HÚMEDO	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA (ω)
N°	N°	g	g	g	g	g	%
1	A-4	118 03	216 04	165 27			

6. Finalmente con los datos obtenidos se llena la tabla, como se muestra a continuación:

$$W_w = [W_{cap+sh}] - [W_{cap+ss}]$$

donde:

W_w = peso del agua

W_{cap+sh} = peso de cápsula más suelo húmedo

W_{cap+ss} = peso de cápsula más suelo seco

PRUEBA	CAPSULA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO HUMEDO	PESO DE CAPSULA MAS SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA (ω)
N°	N°	g	g	g	g	g	%
1	A-4	118 03	216 04	165 27	50 77		

$$W_{ss} = [W_{cap+ss}] - [W_{cap}]$$

donde:

W_{ss} = peso del suelo seco

W_{cap+ss} = peso de cápsula más suelo seco

W_{cap} = peso de la cápsula

PRUEBA	CÁPSULA	PESO DE LA CÁPSULA	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO HÚMEDO	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA (ω)
N°	N°	g	g	g	g	g	%
1	A-4	118.03	216.04	165.27	50.77	47.24	

Finalmente calculamos el Contenido de Agua (ω) con la siguiente expresión:

$$\omega(\%) = \frac{W_w}{W_{ss}} \times 100$$

donde:

ω = contenido de agua (%)

W_w = peso del agua

W_{ss} = peso del suelo seco

PRUEBA	CÁPSULA	PESO DE LA CÁPSULA	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO HÚMEDO	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA (ω)
N°	N°	G	g	g	g	g	%
1	A-4	118.03	216.04	165.27	50.77	47.24	107.47

O de manera general se aplica la siguiente expresión:

$$\omega(\%) = \frac{W_{cap+sh} - W_{cap+ss}}{W_{cap+ss} - W_{cap}} \times 100$$

donde.

ω = contenido de agua (%)

W_{cap+sh} = peso de cápsula más suelo húmedo

W_{cap+ss} = peso de cápsula más suelo seco

W_{cap} = peso de la cápsula

Horno de Microondas

Debido a que las moléculas del agua son dipolares⁶ y cuando ésta se somete a un calentamiento por medio del horno de microondas, sus moléculas se mueven y entran a un movimiento continuo, ya que el campo eléctrico al cual están siendo sometidas es de tipo alterno, por lo tanto, debido a la naturaleza de las moléculas del agua producen calor ya que la fricción entre las moléculas lo produce. Cuanto mayor es la capacidad de

⁶ Las moléculas de agua se comportan como el centro de los cargas negativas

los materiales a cambiar su polaridad, mayor es su constante dieléctrica⁹, la cual afecta directamente el tiempo de calentamiento de cada material.

Los Hornos de Microondas caseros trabajan a una frecuencia de 2000 MHz, es decir, que los objetos introducidos en él son manipulados por un campo eléctrico a dicha frecuencia, los materiales que se introducen al horno se pueden clasificar en tres tipos: absorbedores (líquidos), reflectores (metales) y trasmisores (no metales). Las especificaciones y procedimiento para el empleo del horno de microondas están bajo normas de la ASTM (ASTM D4643-00, ver Anexo).

Equipo:

- Báscula de precisión de 0.01 g
- Horno de Microondas tipo casero
- Recipientes no metálico que no sufran cambios de peso o forma, cuando sean sometidos a calor, enfriamiento o limpieza.
- Guantes
- Pinzas
- Espátula
- Hoja, con formato de registro

Procedimiento:

1. Determinar el peso del recipiente limpio y seco en el cual se colocará el material húmedo, previamente identificado.
2. Colocar el material húmedo que se necesitará en la prueba en el recipiente seleccionado. Luego pesar el recipiente con el suelo húmedo.
3. Introducir el recipiente con el material húmedo al horno y encender por 3 minutos.
4. Sacar la muestra con ayuda de los guantes, y dejarlo enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente, una vez alcanzada la temperatura ambiente, se pesa.
5. Con la ayuda de la espátula mezclar el suelo cuidando no perder suelo.
6. Introducir nuevamente la muestra al horno, y encenderlo por 1 minuto.
7. Repetir pasos 4, 5 y 6 hasta que la diferencia de pesos sea poco significativa, en el cálculo del contenido de agua.
8. Se utiliza el último peso del recipiente con suelo para determinar el contenido de agua, calculando con la siguiente expresión:

$$\omega(\%) = \frac{W_{cap+sh} - W_{cap+ss}}{W_{cap+ss} - W_{cap}} \times 100$$

donde:

- ω = contenido de agua (%)
- W_{cap+sh} = peso de cápsula más suelo húmedo
- W_{cap+ss} = peso de cápsula más suelo seco

⁹ La constante dieléctrica de un material homogéneo se define como la razón de la capacitancia de un capacitor con el material entre sus placas, a la capacitancia en vacío.

W_{cap} = peso de la cápsula

En el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería (UNAM) se cuenta con horno de microondas el cual debe ser calibrado por el personal que funge como responsable del mismo. Ya que deben existir procedimientos para uso de todos los equipos.

Método de la Estufa

Este método es para una determinación rápida del contenido de agua, haciendo uso de una lámpara de gasolina o cualquier tipo de estufa de llama abierta (secado por conducción de calor), siendo este método muy popular en el trabajo en campo.

La mayoría de los suelos se pueden secar usando esta técnica pero si su composición mineralógica es de halloysita, mica, montmorillonita, yeso u otro material hidratado, suelos con gran contenido de materia orgánica¹⁰ o suelos con alto contenido de sales (suelos marinos) este método no proporciona valores aceptables del contenido de agua. Las especificaciones y procedimiento para los métodos de secado directo están bajo normas de la ASTM (ASTM D4959-00, ver Anexo).

Método por medio de una balanza equipada con lámpara de rayos infrarrojos

"Las fuentes de rayos infrarrojos propagan el calor por medio de radiación a diferencia de la propagación de calor del horno que es por convección. El concepto físico de radiación se refiere a la emisión continua de energía, no sólo de fuentes de rayos infrarrojos sino de todas las superficies de los cuerpos. Esta energía se denomina energía radiante y se encuentra en forma de ondas electromagnéticas que se propagan con la velocidad de la luz y se transmiten a través del vacío, lo mismo que a través del aire. Cuando incide sobre un cuerpo que no es transparente a ellas, son absorbidas y su energía transformada en calor.

La firma CENCO ha construido un dispositivo para determinar la humedad de varios materiales que pueden ser finamente divididos por tamizado, pulverización u otros métodos. Es efectivo para cualquier material del cual la humedad pueda ser eliminada por el calor de la lámpara de rayos infrarrojos con tal que el calor no cambie la composición química del material. Se emplea una balanza torsional sensible para pesar la muestra y una lámpara de rayos infrarrojos para secarla. Un tambor tiene una escala graduada en porcentaje de 0 a 100. La balanza está arreglada para que las lecturas sean hechas continuamente; estas lecturas indican en cualquier tiempo dado el porcentaje de la pérdida en peso de la muestra debido a la pérdida de humedad."¹¹

¹⁰ Ya que este método utiliza temperaturas mayores a 110 °C para secar la muestra, provoca que se calcine el material, siendo el mayor inconveniente en materiales que contengan materia orgánica, ya que al quemarse esta se introduce un error al considerar esta pérdida con pérdida del contenido de agua.

¹¹ S. Benson, U. J. y Zarate, A. M. Métodos de Control Rápido de la Compactación y la Humedad en Terapienes, publicación de la Sociedad de Obras Públicas de México (1934)

Método del Alcohol

Existen dos modalidades de este método, la primera basada en su combustión y la segunda basada en los cambios de su densidad. El primero consiste en que cuando se disgrega el suelo húmedo en determinada cantidad de alcohol y quemando esta hasta su combustión total, el residuo se supone que es la fase mineral del suelo ya totalmente seca y finalmente se aplica la expresión para determinar el contenido de agua. Sin embargo, este procedimiento de secado puede sobrecalentar la muestra desapareciendo a la materia orgánica por ejemplo. El segundo parte de la propiedad que tiene el alcohol para entrar en íntima solución con el agua, por lo cual se disgrega completamente el suelo húmedo con determinado volumen de alcohol, entonces la cantidad de agua presente en la muestra se incorporará con el alcohol modificando su densidad. La densidad de la muestra agua-alcohol es posible calibrarla con el contenido de agua determinado en el horno de convección; pero para esto es necesario conocer las características del alcohol y un volumen fijo, y el peso húmedo de la muestra. Con el densímetro es posible medir la mezcla agua alcohol considerando que la densidad cambia con respecto a la temperatura de la mezcla.

Método Volumétrico

Es recomendable el uso de este método para determinación rápida del contenido de humedad, ya que proporciona una aproximación buena. Es recomendable en suelos limosos y arenosos.

Este método se basa en que al entrar en suspensión un peso conocido de suelo húmedo en un volumen de agua conocido, y eliminando el aire que pudiera quedar atrapado el volumen resultante de la suspensión aumentará su volumen, que representa el volumen de sólidos y del agua que contenía el suelo. Conociendo estos datos es suficiente para determinar el contenido de agua con la siguiente expresión.

$$\omega(\%) = \frac{W_{sh} - \Delta V \cdot G_s \cdot \gamma_0}{\Delta V \cdot G_s \cdot \gamma_0 - W_{sh} \cdot G_s} \times 100$$

donde:

$\omega(\%)$ = contenido de agua

W_{sh} = peso del suelo húmedo

ΔV = incremento de volumen

G_s = densidad de sólido

γ_0 = peso específico del agua

sabiendo que $G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_0}$, γ_s = peso específico de sólidos.

V Pruebas de Laboratorio y resultados obtenidos

V.I Descripción de las muestras utilizadas

Para la realización de la investigación se trabajó con ocho tipos de suelos, de los cuales el proveedor me facilitó las hojas técnicas de cuatro de ellos, los cuatro restantes no fue posible mandarlos a laboratorio para obtener su análisis químico por razones económicas.

La elección de los suelos se hizo con base a la granulometría, ya que es el interés el de esta investigación trabajar con suelos finos (aquellos que pasan por la malla No. 40 -0.42 mm-). Los suelos elegidos fueron: Arcilla Gris, Bentonita Cálcica, Arcilla Refractaria, Arcilla Zacatecas, Caolín Blanco, Arcilla Amarilla, Barro Oaxaca y Arcilla Café (Ver figuras 5.1 y 5.2).

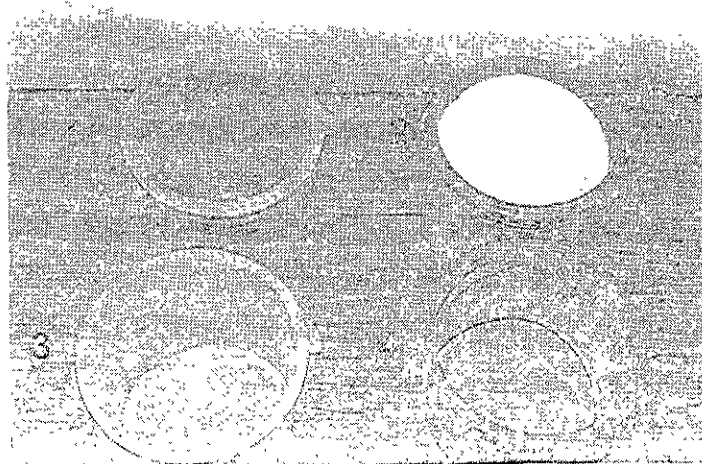


Figura 5.1 Materiales utilizados
1) Arcilla Gris, 2) Bentonita Cálcica,
3) Arcilla Refractaria , 4) Arcilla Zacatecas

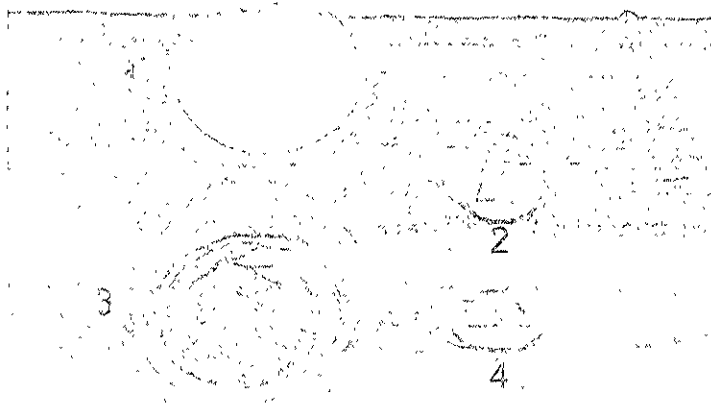


Figura 5.2 Materiales utilizados
1) Caolín Blanco, 2) Arcilla Amarilla,
3) Barro Oaxaca 4) Arcilla Café

HOJA TÉCNICA

Material: Arcilla Gris

Análisis Químico:

SiO ₂	62.02 %
Al ₂ O ₃	19.09 %
Fe ₂ O ₃	1.20 %
MgO	0.57 %
CaO	0.23 %
BaO	0.05 %
Na ₂ O	0.06 %
K ₂ O	1.71 %
TiO ₂	0.68 %
ZrO ₂	0.03 %
S Total	0.18 %
P.P.I.	13.10 %

Máximo 5% de retenido en malla 200 ó 325.

HOJA TÉCNICA

Material: Bentonita Cálcica

Análisis Químico:

SiO ₂	55.00 % Min
Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	20.00 % Min
Carbonatos	0.10 % Max
Alcalinidad	0.75 % Max
P.P.I	3.00 % Max
Malla 200 (pasa)	90.00 % Min

Máximo 5% de retenido en malla 200 ó 325.

HOJA TÉCNICA

Material: Caolín Blanco

Análisis Químico.

SiO ₂	48.30 %
Al ₂ O ₃	35.80 %
Fe ₂ O ₃	0.46 %
MgO	0.08 %
BaO	0.05 %
Na ₂ O	0.02 %
K ₂ O	0.05 %
TiO ₂	0.79 %
ZrO ₂	0.15 %
P.P.I.	14.10 %

Máximo 5% de retenido en malla 200.

HOJA TÉCNICA

Material: Arcilla Refractaria

Análisis Químico:

SiO ₂	53.53 %
Al ₂ O ₃	41.58 %
Fe ₂ O ₃	2.52 %
MgO	0.16 %
CaO	0.17 %
Ti ₂ O	1.85 %
Alcalis	0.19 %
P.P.I.	0.19 %

Pruebas Físicas.

Cono Pirométrico equivalente 34-39

Densidad.

2.53 gr/cm³

Temperatura Calcificación:

1430° a 1440° C

- La Arcilla Amarilla y la Arcilla Café son originarias de Veracruz

V.II Pruebas de Laboratorio

Las pruebas de laboratorio se realizaron en dos fases, en la primera fase se determinaron los Límites Líquidos utilizando la Copa de Casagrande y Límite Plástico de los ocho suelos investigados; la segunda fase fue la determinación de los Límites Líquidos con el Cono Inglés.

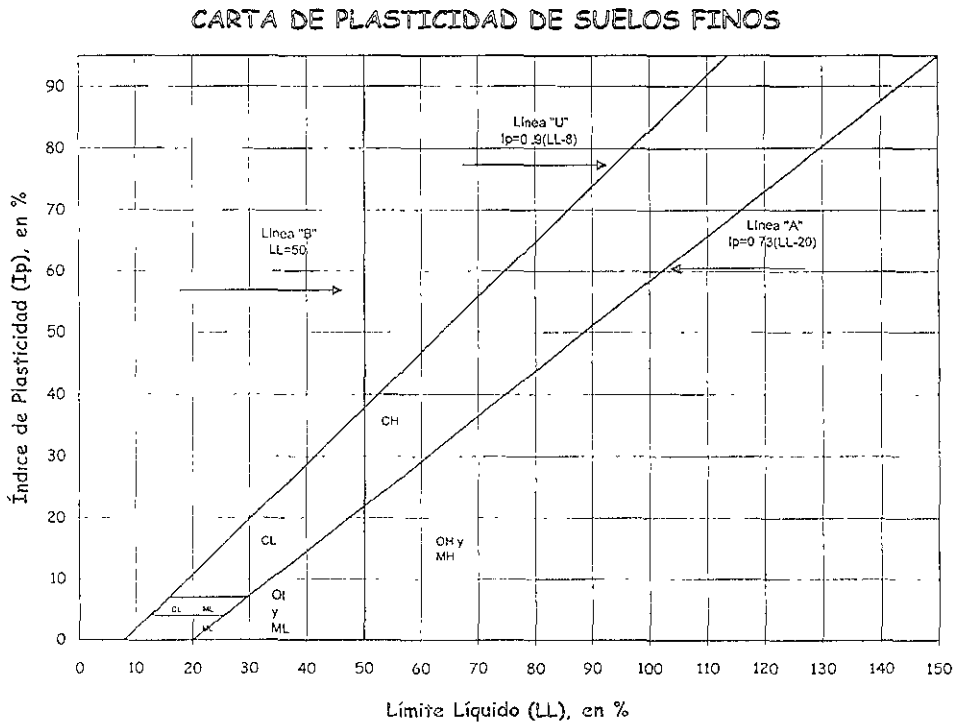
Una vez conocido el Límite Plástico y el Límite Líquido de la Copa de Casagrande y el Cono Inglés se determinaron los índices Plásticos (para cada uno de los métodos) de los ocho tipos de suelo, con la siguiente expresión.

$$IP = LL - LP$$

donde

- IP = Índice plástico
- LL = Límite líquido
- LP = Límite plástico

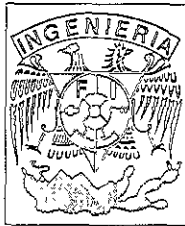
Conocidos los Índices Plásticos y Límites Líquidos se utilizó la carta de plasticidad (ver cuadro 5.1) para la clasificación de la fracción fina.



Cuadro 5 1 Carta de Plasticidad de Suelos Finos

V.III Resultados

**CLASIFICACION DE SUELOS
CONTENIDO DE AGUA Y
LÍMITES DE CONSISTENCIA
COPA DE CASAGRANDE**



FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

OBRA TESIS DE LICENCIATURA

LOCALIZACIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

SONDEO: _____ MUESTRA _____

PROFUNDIDAD: _____ m

DESCRIPCIÓN: Arcilla Gris

OPERADOR FBP FECHA 08-Oct-00

CONTENIDO DE AGUA NATURAL

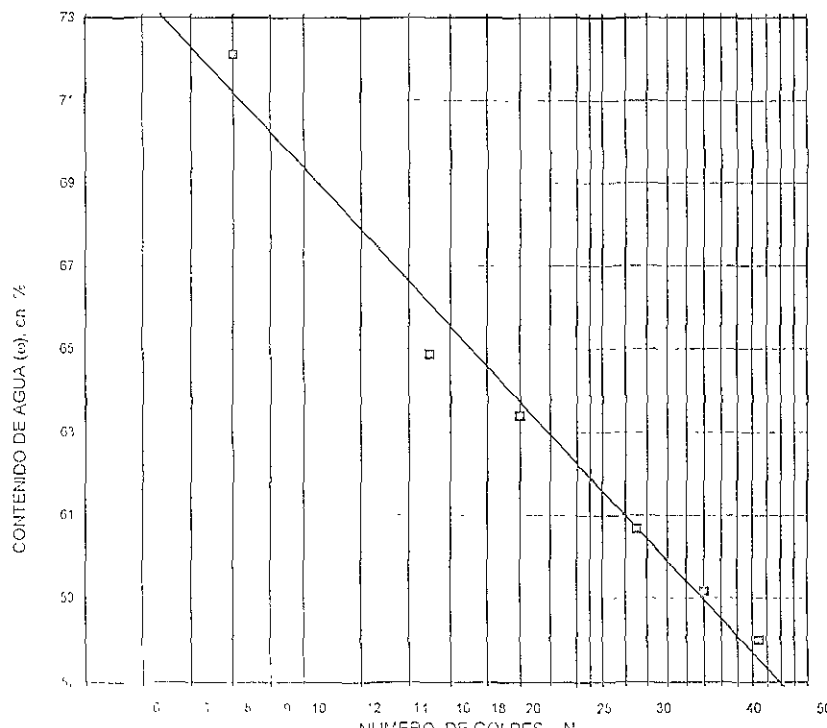
PRUEBA N°	NUMERO DE GOLPES			CÁPSULA N°	PESO DE LA CAPSULA g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO HUMEDO g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO SECO g	PESO DEL AGUA g	PESO DEL SUELO SECO g	CONTENIDO DE AGUA (w) %
	1°	2°	3°							

LÍMITE PLÁSTICO

PRUEBA	CÁPSULA	PESO DE LA CAPSULA g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO HUMEDO g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO SECO g	PESO DEL AGUA g	PESO DEL SUELO SECO g	CONTENIDO DE AGUA (%)
1	Y-1	37.77	38.66	38.44	0.22	0.67	32.84
2	W-4	60.58	61.61	61.35	0.26	0.77	33.77
3	C-1	60.46	61.40	61.17	0.23	0.71	32.39

LÍMITE LÍQUIDO

PRUEBA	N°	CÁPSULA	PESO DE LA CAPSULA g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO HUMEDO g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO SECO g	PESO DEL AGUA g	PESO DEL SUELO SECO g	CONTENIDO DE AGUA (%)
1	8	X-3	58.78	65.32	62.58	2.74	3.80	72.11
2	15	B-5	37.98	44.41	41.88	2.53	3.90	64.87
3	20	Y-1	37.77	42.77	40.83	1.94	3.06	63.40
4	29	X-0	59.68	64.42	62.63	1.79	2.95	60.68
5	36	B-0	60.40	66.48	64.22	2.26	3.82	59.16
6	43	U-3	38.09	43.92	41.78	2.14	3.69	57.99



w = _____ %

LL = 61.93 %

LP = 32.99 %

IP = 28.93 %

Fw = -18.75 %

Cr = _____

Tw = -1.54

CLASIFICACIÓN DE LA PORCIÓN FINA

S.U.C.S. MH

OBSERVACIONES _____

CLASIFICACION DE SUELOS
CONTENIDO DE AGUA Y
LÍMITES DE CONSISTENCIA
CONO INGLÉS

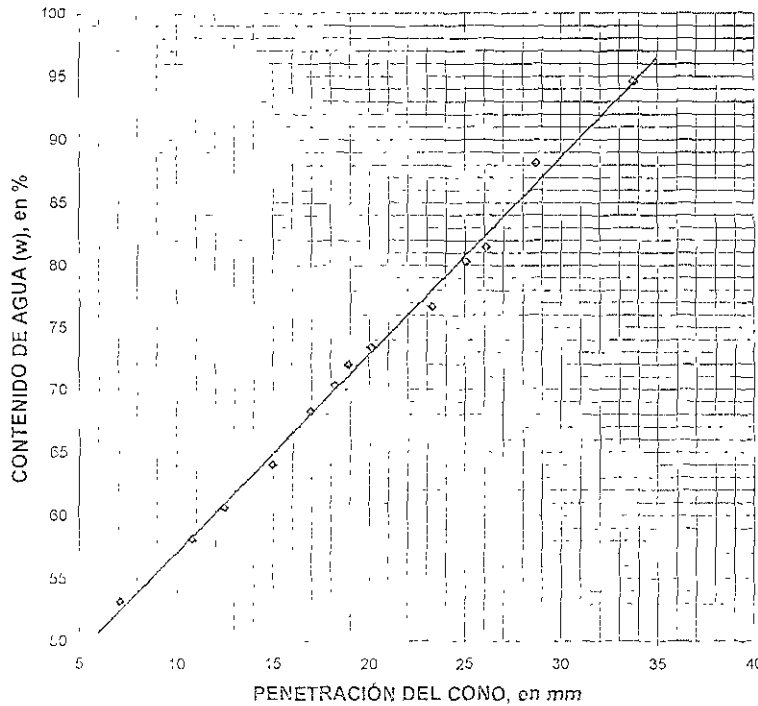


FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

OBRA: TESIS DE LICENCIATURA
LOCALIZACIÓN: FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
SONDEO: _____ MUESTRA: _____
PROFUNDIDAD: _____ m
DESCRIPCIÓN: Arcilla Gris
OPERADOR: FBP FECHA: 26-Ene-01

CONTENIDO DE AGUA NATURAL

PRUEBA N°	PENETRACIÓN DE CONO INGLÉS mm	CÁPSULA N°	PESO DE LA CÁPSULA g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO HUMEDO g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO SECO g	PESO DEL AGUA g	PESO DEL SUELO SECO g	CONTENIDO DE AGUA (w) %
1	7.10	Z-5	38.12	55.72	49.61	6.11	11.48	53.18
2	10.80	W-9	37.82	61.66	52.90	8.76	15.08	58.09
3	12.50	A-8	60.69	81.11	73.40	7.71	12.71	60.66
4	15.00	B-1	60.48	78.95	71.74	7.21	11.26	64.03
5	17.00	B-5	37.98	58.80	49.16	7.64	11.18	68.34
6	18.20	Y-1	37.77	59.20	50.35	8.85	12.58	70.35
7	18.95	C-9	37.92	55.38	48.65	7.73	10.73	72.04
8	20.10	U-3	38.09	54.36	47.47	6.89	9.38	73.45
9	23.30	V-10	38.19	57.22	48.96	8.26	10.77	76.69
10	25.10	C-1	60.46	79.59	71.07	8.52	10.61	80.30
11	26.10	B-0	60.41	79.97	71.19	8.78	10.78	81.45
12	26.70	S/N	40.10	58.07	49.65	8.42	9.55	88.17
13	33.75	X-5	37.96	57.11	47.80	9.31	9.84	94.61
14								
15								
16								



$w =$ _____ %
LL = 72.83 %
LP = 32.99 %
IP = 39.83 %
Fw = 1.58 %
Cr = _____
Tw = _____

CLASIFICACIÓN DE LA PORCIÓN FINA

S.U.C.S. CH

OBSERVACIONES _____

CLASIFICACION DE SUELOS
CONTENIDO DE AGUA Y
LÍMITES DE CONSISTENCIA
COPA DE CASAGRANDE



FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

OBRA: TESIS DE LICENCIATURA
LOCALIZACIÓN: FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
SONDEO: _____ MUESTRA _____
PROFUNDIDAD: _____ m
DESCRIPCIÓN: Bentonita Cálcica
OPERADOR: FBP FECHA 21-Oct-00

CONTENIDO DE AGUA NATURAL

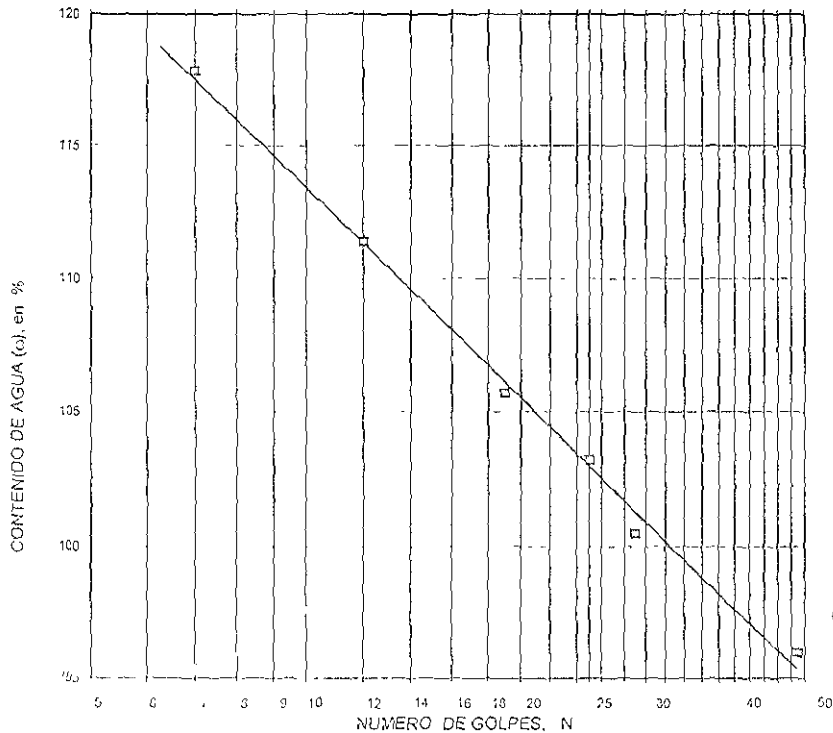
PRUEBA N°	NUMERO DE GOLPES			CÁPSULA N°	PESO DE LA CÁPSULA g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO HÚMEDO g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO SECO g	PESO DEL AGUA g	PESO DEL SUELO SECO g	CONTENIDO DE AGUA (ω) %
	1°	2°	3°							

LÍMITE PLÁSTICO

PRUEBA	NUMERO DE GOLPES	CÁPSULA	PESO DE LA CÁPSULA g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO HÚMEDO g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO SECO g	PESO DEL AGUA g	PESO DEL SUELO SECO g	CONTENIDO DE AGUA (ω) %
1	7	U-3	38.09	39.18	38.92	0.26	0.83	31.33
2	12	B-0	60.41	61.40	61.15	0.25	0.74	33.78
3	19	X-0	59.69	60.45	60.26	0.19	0.57	33.33

LÍMITE LÍQUIDO

PRUEBA	NUMERO DE GOLPES	CÁPSULA	PESO DE LA CÁPSULA g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO HÚMEDO g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO SECO g	PESO DEL AGUA g	PESO DEL SUELO SECO g	CONTENIDO DE AGUA (ω) %
1	7	B-0	60.41	68.23	64.00	4.23	3.59	117.83
2	12	X-3	58.79	66.21	62.30	3.91	3.51	111.40
3	19	Z-8	60.13	68.42	64.16	4.26	4.03	105.71
4	25	X-0	59.69	67.25	63.41	3.84	3.72	103.23
5	29	C-3	38.07	46.01	42.03	3.98	3.96	100.51
6	49	Y-1	37.77	44.10	41.00	3.10	3.23	95.98



ω = _____ %
LL = 103.00 %
LP = 32.80 %
IP = 70.20 %
Fw = -26.24 %
Cr = _____
Tw = -2.68

CLASIFICACIÓN DE LA PORCIÓN FINA

S U C S C H

OBSERVACIONES _____

Pruebas de Laboratorio y resultados obtenidos

CLASIFICACION DE SUELOS
CONTENIDO DE AGUA Y
LÍMITES DE CONSISTENCIA

CONO INGLÉS

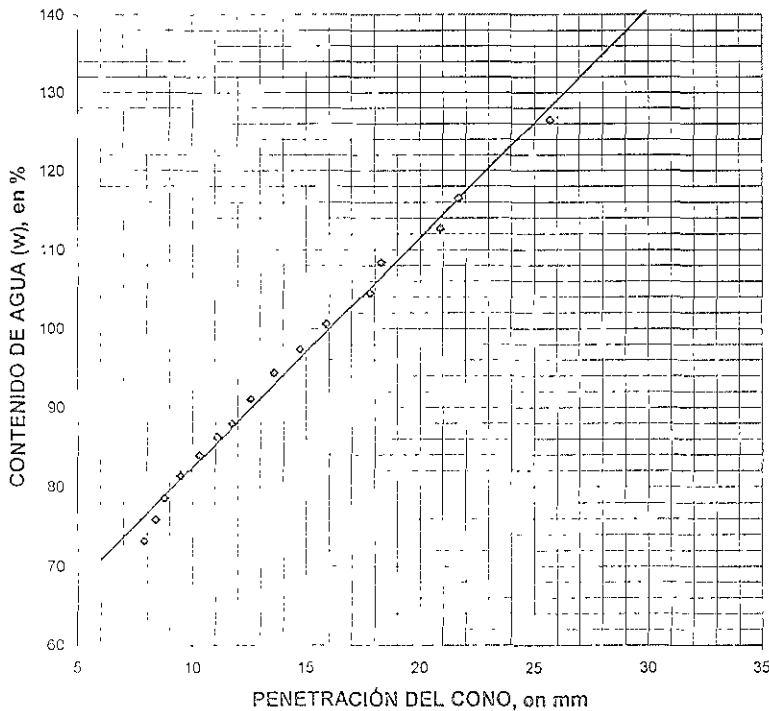


FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

OBRA: TESIS DE LICENCIATURA
LOCALIZACIÓN: FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
SONDEO: _____ MUESTRA: _____
PROFUNDIDAD: _____ m
DESCRIPCIÓN: Bentonita Cálcica
OPERADOR: FBP FECHA: 29-Ene-01

CONTENIDO DE AGUA NATURAL

PRUEBA N°	PENETRACIÓN DE CONO INGLÉS mm	CÁPSULA N°	PESO DE LA CÁPSULA g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO HÚMEDO g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO SECO g	PESO DEL AGUA g	PESO DEL SUELO SECO g	CONTENIDO DE AGUA (w) %
1	7.90	C-9	37.91	59.61	50.44	9.17	12.53	73.18
2	8.40	C-1	60.46	79.49	71.28	8.21	10.82	75.88
3	8.80	X-5	37.95	55.36	47.70	7.66	9.75	78.56
4	9.50	Y-1	37.77	57.86	48.85	9.01	11.08	81.32
5	10.30	U-3	38.09	55.50	47.55	7.95	9.46	84.04
6	11.10	B-0	60.41	82.75	72.40	10.35	11.99	86.32
7	11.75	B-5	37.98	56.03	47.58	8.45	9.60	88.02
8	12.60	S/N	40.09	58.57	49.76	8.81	9.67	91.11
9	13.60	Z-8	60.13	83.21	72.00	11.21	11.87	94.44
10	14.75	X-3	58.79	80.84	69.96	10.88	11.17	97.40
11	15.90	X-2	60.24	76.41	68.30	8.11	8.06	100.62
12	17.80	X-4	60.30	77.38	68.65	8.73	8.35	104.55
13	18.30	V-2	60.61	79.20	69.53	9.67	8.92	108.41
14	20.90	V-6	38.17	56.42	46.75	9.67	8.58	112.70
15	21.70	Y-0	61.14	80.13	69.91	10.22	8.77	116.53
16	25.70	B-2	59.36	82.30	69.49	12.81	10.13	126.46



$\omega =$ _____ %
LL = 111.54 %
LP = 32.80 %
IP = 78.75 %
Fw = 2.91 %
Cr = _____
Tw = _____

CLASIFICACIÓN DE LA PORCIÓN FINA

S.U.C.S. CH

OBSERVACIONES _____

Pruebas de Laboratorio y resultados obtenidos

CLASIFICACION DE SUELOS
CONTENIDO DE AGUA Y
LÍMITES DE CONSISTENCIA

COPA DE CASAGRANDE



FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

OBRA	TESIS DE LICENCIATURA	
LOCALIZACIÓN	FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM	
SONDEO:	_____	MUESTRA _____
PROFUNDIDAD:	_____	m
DESCRIPCIÓN	Arcilla Refractaria	
OPERADOR:	FBP	FECHA 08-Nov-00

CONTENIDO DE AGUA NATURAL

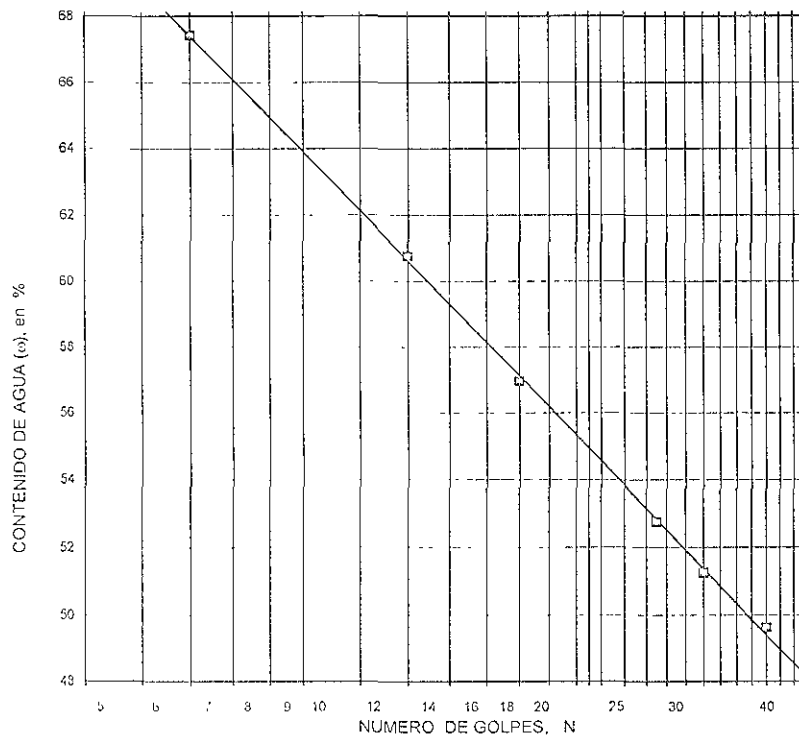
PRUEBA N°	NUMERO DE GOLPES			CÁPSULA N°	PESO DE LA CÁPSULA g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO HÚMEDO g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO SECO g	PESO DEL AGUA g	PESO DEL SUELO SECO g	CONTENIDO DE AGUA (ω) %
	1°	2°	3°							

LÍMITE PLÁSTICO

PRUEBA	NUMERO DE GOLPES	CÁPSULA	PESO DE LA CÁPSULA g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO HÚMEDO g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO SECO g	PESO DEL AGUA g	PESO DEL SUELO SECO g	CONTENIDO DE AGUA (ω) %
1	7	U-3	38.09	38.99	38.85	0.14	0.76	18.42
2	14	Z-2	60.31	60.93	60.83	0.10	0.52	19.23
3	20	U-2	37.95	38.47	38.39	0.08	0.44	18.18

LÍMITE LÍQUIDO

PRUEBA	NUMERO DE GOLPES	CÁPSULA	PESO DE LA CÁPSULA g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO HÚMEDO g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO SECO g	PESO DEL AGUA g	PESO DEL SUELO SECO g	CONTENIDO DE AGUA (ω) %
1	7	V-10	38.19	45.59	42.61	2.98	4.42	67.42
2	14	X-4	60.29	67.99	65.08	2.91	4.79	60.75
3	20	X-5	37.95	46.19	43.20	2.99	5.25	56.95
4	31	V-7	59.95	66.61	64.31	2.30	4.36	52.75
5	36	B-1	60.48	67.12	64.87	2.25	4.39	51.25
6	44	A-8	60.69	68.98	66.23	2.75	5.54	49.64



ω = _____ %
 LL = 54.94 %
 LP = 18.61 %
 IP = 36.34 %
 Fw = -22.53 %
 Cr = _____
 Tw = -1.61

CLASIFICACIÓN DE LA PORCIÓN FINA

S.U.C.S. CH

OBSERVACIONES _____

FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



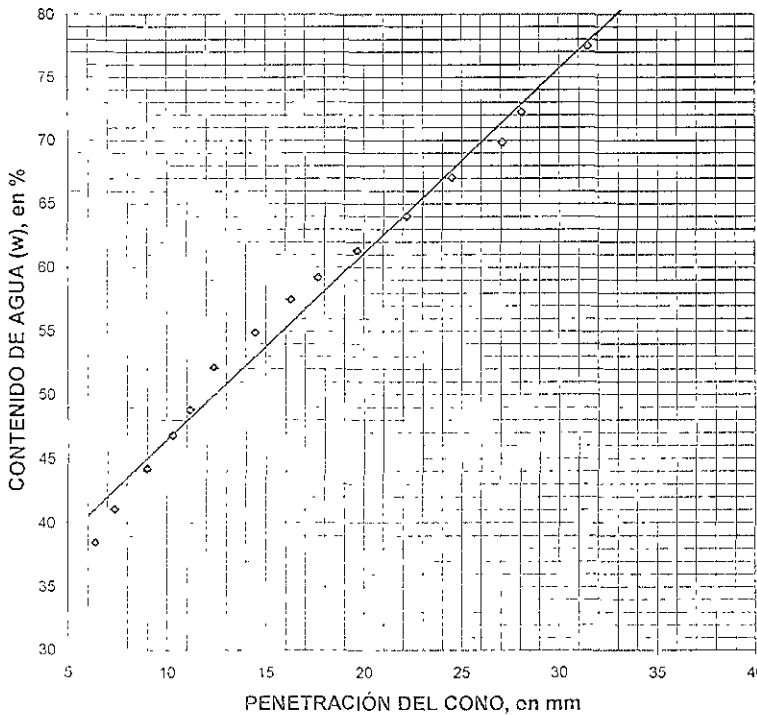
CLASIFICACION DE SUELOS
CONTENIDO DE AGUA Y
LÍMITES DE CONSISTENCIA

CONO INGLÉS

OBRA	TESIS DE LICENCIATURA	
LOCALIZACIÓN	FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM	
SONDEO	_____	MUESTRA _____
PROFUNDIDAD:	_____ m	
DESCRIPCIÓN:	Arcilla Refractaria	
OPERADOR:	FBP	FECHA 31-Ene-01

CONTENIDO DE AGUA NATURAL

PRUEBA N°	PENETRACIÓN DE CONO INGLÉS mm	CÁPSULA N°	PESO DE LA CÁPSULA g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO HÚMEDO g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO SECO g	PESO DEL AGUA g	PESO DEL SUELO SECO g	CONTENIDO DE AGUA (w) %
1	6.40	C-9	37.93	55.46	50.59	4.87	12.66	38.47
2	7.40	U-3	38.10	56.63	51.23	5.40	13.13	41.13
3	9.00	Z-8	60.14	82.08	75.35	6.73	15.21	44.25
4	10.30	Y-1	37.78	58.57	51.94	6.63	14.16	46.82
5	11.20	B-2	59.36	84.96	76.56	8.40	17.20	48.84
6	12.40	V-6	38.17	63.66	54.92	8.74	16.75	52.18
7	14.50	B-0	60.41	82.95	74.96	7.99	14.55	54.91
8	16.30	X-3	58.80	84.49	75.11	9.38	16.31	57.51
9	17.70	C-1	60.46	87.77	77.61	10.16	17.15	59.24
10	19.70	B-5	37.98	63.02	53.50	9.52	15.52	61.34
11	22.20	V-2	60.61	83.33	74.46	8.87	13.85	64.04
12	24.50	Z-2	60.31	84.00	74.49	9.51	14.18	67.07
13	27.10	X-2	60.24	82.61	73.41	9.20	13.17	69.86
14	28.10	B-7	38.05	62.89	52.47	10.42	14.42	72.26
15	31.50	X-4	60.30	88.88	76.40	12.48	16.10	77.52



$w =$ _____ %
 LL = 61.09 %
 LP = 18.61 %
 IP = 42.48 %
 Fw = 1.46 %
 Cr = _____
 Tw = _____

CLASIFICACIÓN DE LA PORCIÓN FINA

S.U.C.S. CH

OBSERVACIONES _____

**CLASIFICACION DE SUELOS
CONTENIDO DE AGUA Y
LÍMITES DE CONSISTENCIA**

COPA DE CASAGRANDE



FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

OBRA: TESIS DE LICENCIATURA
 LOCALIZACIÓN: FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
 SONDEO: _____ MUESTRA: _____
 PROFUNDIDAD: _____ m
 DESCRIPCIÓN: Arcilla Zacatecas
 OPERADOR: FBP FECHA: 25-Sep-00

CONTENIDO DE AGUA NATURAL

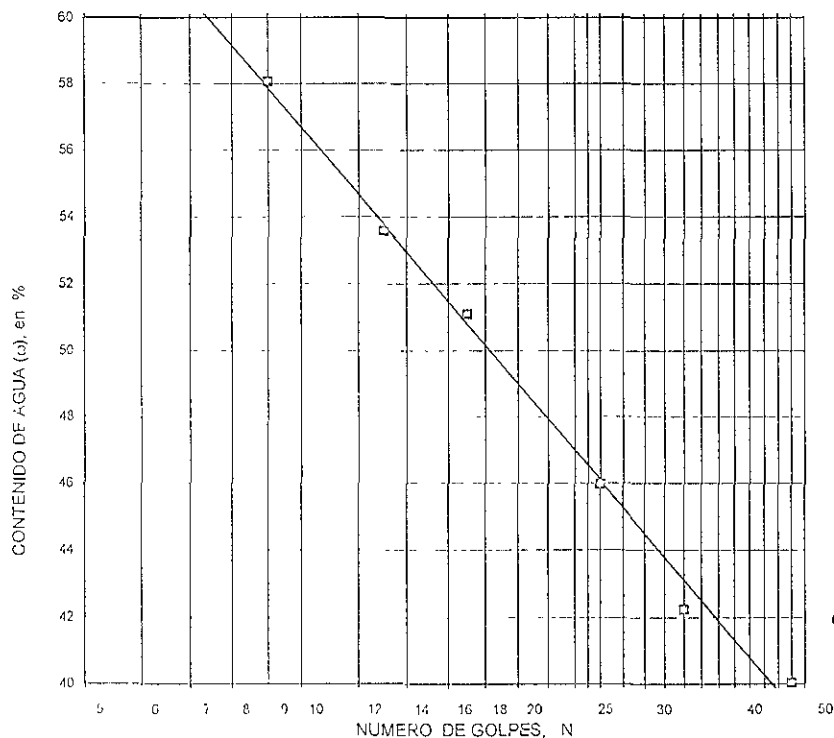
PRUEBA Nº	NUMERO DE GOLFES			CAPSULA Nº	PESO DE LA CÁPSULA g	PESO DE CAPSULA MAS SUELO HÚMEDO g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO SECO g	PESO DEL AGUA g	PESO DEL SUELO SECO g	CONTENIDO DE AGUA (ω) %
	1º	2º	3º							

LÍMITE PLÁSTICO

1		X-3	58.80	60.33	60.08	0.25	1.28	19.53
2		X-9	37.84	39.14	38.92	0.22	1.08	20.37
3		V-7	59.95	60.80	60.66	0.14	0.71	19.72

LÍMITE LÍQUIDO

1	9	W-2	59.62	66.97	64.27	2.70	4.65	58.06
2	13	X-4	60.29	66.74	64.49	2.25	4.20	53.57
3	17	B-0	60.41	74.25	69.57	4.68	9.16	51.09
4	26	X-0	59.68	66.57	64.40	2.17	4.72	45.97
5	34	X-0	59.69	68.58	65.94	2.64	6.25	42.24
6	48	V-10	38.17	45.97	43.74	2.23	5.57	40.04



ω = _____ %
 LL = 46.54 %
 LP = 19.87 %
 IP = 26.67 %
 Fw = -25.50 %
 Cr = _____
 Tw = -1.05

CLASIFICACIÓN DE LA PORCIÓN FINA

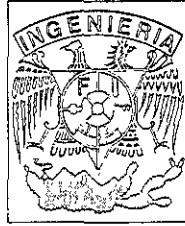
S.U.C.S CL

OBSERVACIONES _____

Pruebas de Laboratorio y resultados obtenidos

CLASIFICACION DE SUELOS
CONTENIDO DE AGUA Y
LÍMITES DE CONSISTENCIA

COPA DE CASAGRANDE



FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

OBRA: TESIS DE LICENCIATURA
LOCALIZACIÓN: FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
SONDEO: _____ MUESTRA _____
PROFUNDIDAD: _____ m
DESCRIPCIÓN: Caolín Blanco
OPERADOR: FBP FECHA 04-Oct-00

CONTENIDO DE AGUA NATURAL

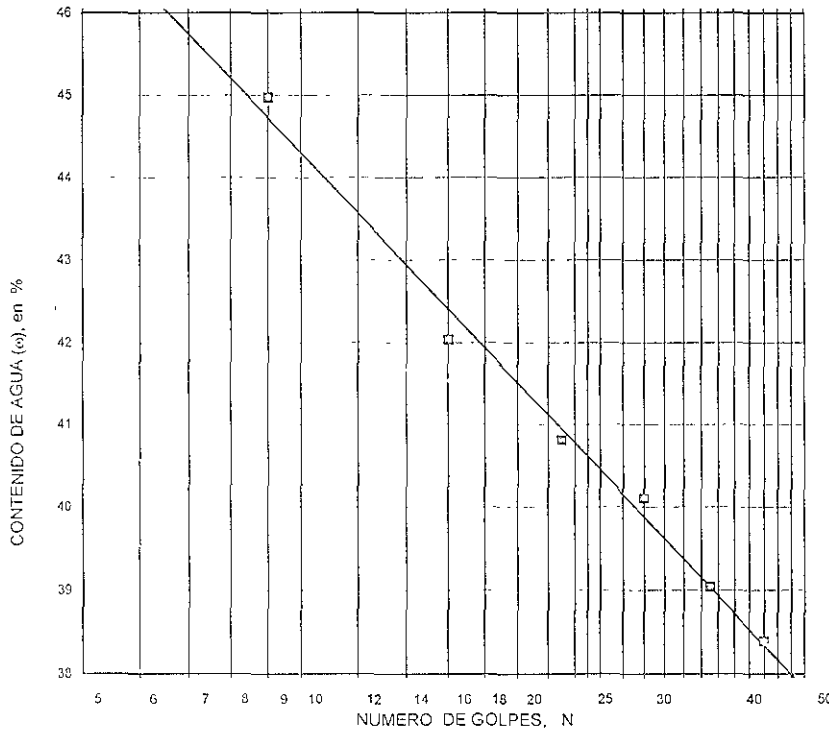
PRUEBA N°	NUMERO DE GOLPES			CAPSULA N°	PESO DE LA CÁPSULA g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO HÚMEDO g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO SECO g	PESO DEL AGUA g	PESO DEL SUELO SECO g	CONTENIDO DE AGUA (w) %
	1°	2°	3°							

LÍMITE PLÁSTICO

1			C-1	60.46	61.28	61.13	0.15	0.67	22.39
2			B-5	37.98	39.46	39.19	0.27	1.21	22.31
3			Y-1	37.77	38.69	38.52	0.17	0.75	22.67

LÍMITE LÍQUIDO

1		9	Z-8	60.13	68.93	66.20	2.73	6.07	44.98
2		16	X-9	37.84	46.76	44.12	2.64	6.28	42.04
3		23	X-3	58.80	67.46	64.95	2.51	6.15	40.81
4		30	W-4	60.59	68.52	66.25	2.27	5.66	40.11
5		37	X-0	55.02	64.60	61.91	2.69	6.89	39.04
6		44	C-3	38.07	45.64	43.54	2.10	5.47	38.39



w = _____ %
LL = 40.62 %
LP = 22.46 %
IP = 18.16 %
Fw = -9.27 %
Cr = _____
Tw = -1.96

CLASIFICACIÓN DE LA PORCIÓN FINA
S.U.C.S. CL

OBSERVACIONES _____

CLASIFICACION DE SUELOS
CONTENIDO DE AGUA Y
LÍMITES DE CONSISTENCIA

CONO INGLÉS

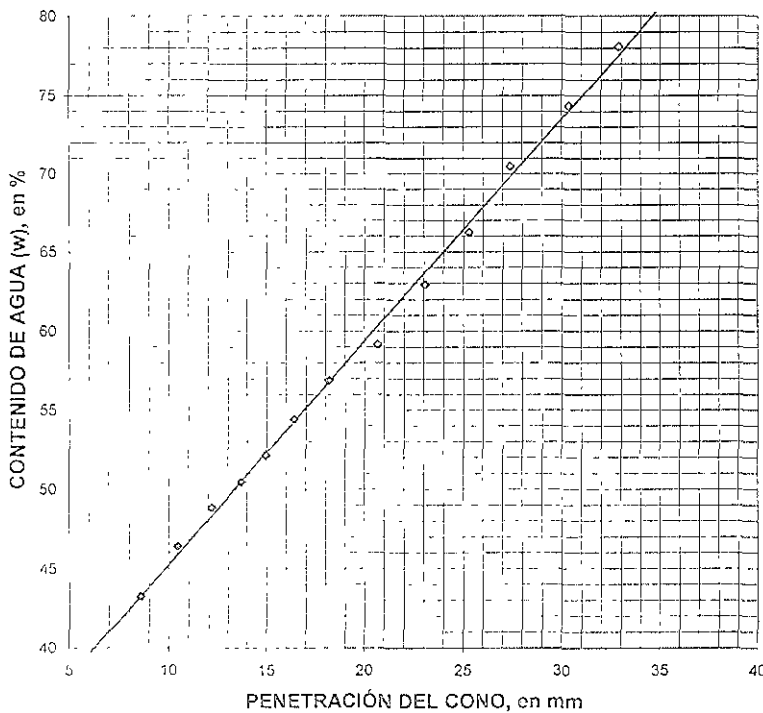


FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

OBRA: TESIS DE LICENCIATURA
LOCALIZACIÓN: FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
SONDEO: _____ MUESTRA _____
PROFUNDIDAD: _____ m
DESCRIPCIÓN: Caolín Blanco
OPERADOR: FBP FECHA: 30-Ene-01

CONTENIDO DE AGUA NATURAL

PRUEBA	PENETRACIÓN DE CONO INGLÉS	CÁPSULA	PESO DE LA CÁPSULA	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO HÚMEDO	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA (w)
N°	mm	N°	g	g	g	g	g	%
1	8.60	V-6	38.17	54.26	49.40	4.86	11.23	43.28
2	10.45	X-3	58.79	80.81	73.83	6.98	15.04	46.41
3	12.20	B-2	59.36	77.85	71.78	6.07	12.42	48.87
4	13.75	C-9	37.92	55.21	49.41	5.80	11.49	50.48
5	15.00	U-3	38.09	55.94	49.82	6.12	11.73	52.17
6	16.40	V-2	60.61	77.66	71.65	6.01	11.04	54.44
7	18.20	B-0	60.40	81.05	73.56	7.49	13.16	56.91
8	20.70	B-5	37.98	59.85	51.72	8.13	13.74	59.17
9	23.10	X-5	37.96	60.43	51.75	8.68	13.79	62.94
10	25.30	C-1	60.45	83.96	74.59	9.37	14.14	66.27
11	27.40	Z-8	60.13	80.57	72.12	8.45	11.99	70.48
12	30.40	X-2	60.23	86.02	75.02	11.00	14.79	74.37
13	32.90	Y-1	37.78	64.96	53.04	11.92	15.26	78.11



$\omega =$ _____ %
LL = 59.37 %
LP = 22.46 %
IP = 36.91 %
Fw = 1.41 %
Cr = _____
TW = _____

CLASIFICACIÓN DE LA PORCIÓN FINA

S.U.C.S. CH

OBSERVACIONES _____

CLASIFICACION DE SUELOS
CONTENIDO DE AGUA Y
LÍMITES DE CONSISTENCIA



FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

OBRA TESIS DE LICENCIATURA
LOCALIZACIÓN: FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
SONDEO: _____ MUESTRA: _____
PROFUNDIDAD: _____ m
DESCRIPCIÓN: Arcilla Amarilla
(Veracruz)
OPERADOR FBP FECHA 19-Ene-01

CONTENIDO DE AGUA NATURAL

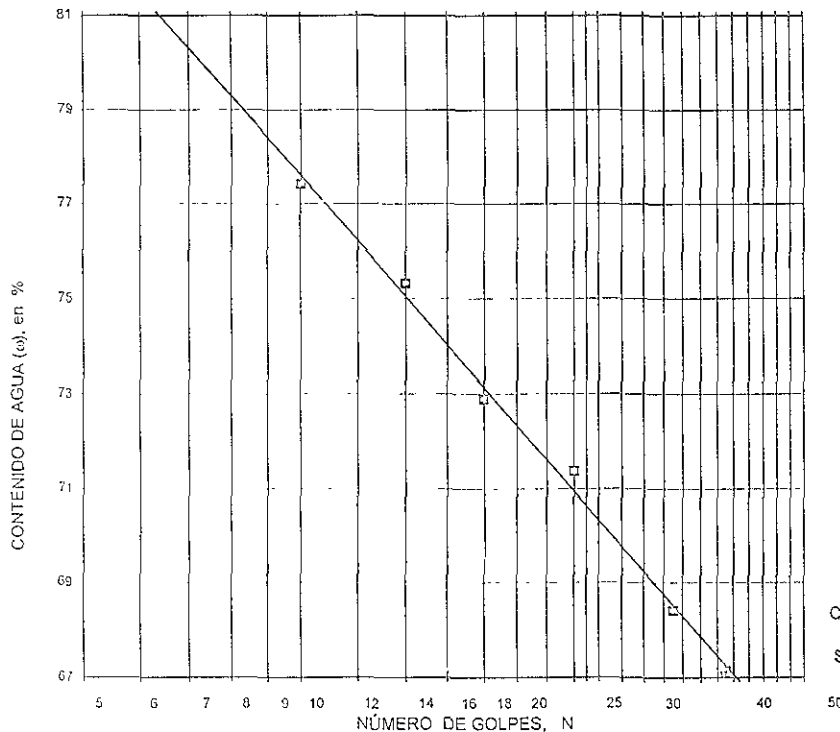
PRUEBA N°	NUMERO DE GOLPES			CÁPSULA N°	PESO DE LA CÁPSULA g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO HÚMEDO g	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO SECO g	PESO DEL AGUA g	PESO DEL SUELO SECO g	CONTENIDO DE AGUA (ω) %
	1°	2°	3°							

LÍMITE PLÁSTICO

1				B-5	37.97	39.44	39.11	0.33	1.14	28.95
2				Y-1	37.77	38.89	38.64	0.25	0.87	28.74
3				A-8	60.69	61.98	61.69	0.29	1.00	29.00

LÍMITE LÍQUIDO

1		10		X-3	58.75	66.45	63.09	3.36	4.34	77.42
2		14		B-2	59.32	67.70	64.10	3.60	4.78	75.31
3		18		U-2	37.95	46.18	42.71	3.47	4.76	72.90
4		24		U-3	38.07	45.97	42.68	3.29	4.61	71.37
5		33		C-9	37.90	45.95	42.68	3.27	4.78	68.41
6		39		C-1	60.43	68.62	65.33	3.29	4.90	67.14



ω = _____ %
LL = 70.64 %
LP = 28.89 %
IP = 41.75 %
Fw = -17.5 %
Cr = _____
Tw = -2.38

CLASIFICACIÓN DE LA PORCIÓN FINA
S.U.C.S. CH

OBSERVACIONES _____

CLASIFICACION DE SUELOS
CONTENIDO DE AGUA Y
LÍMITES DE CONSISTENCIA

CONO INGLÉS

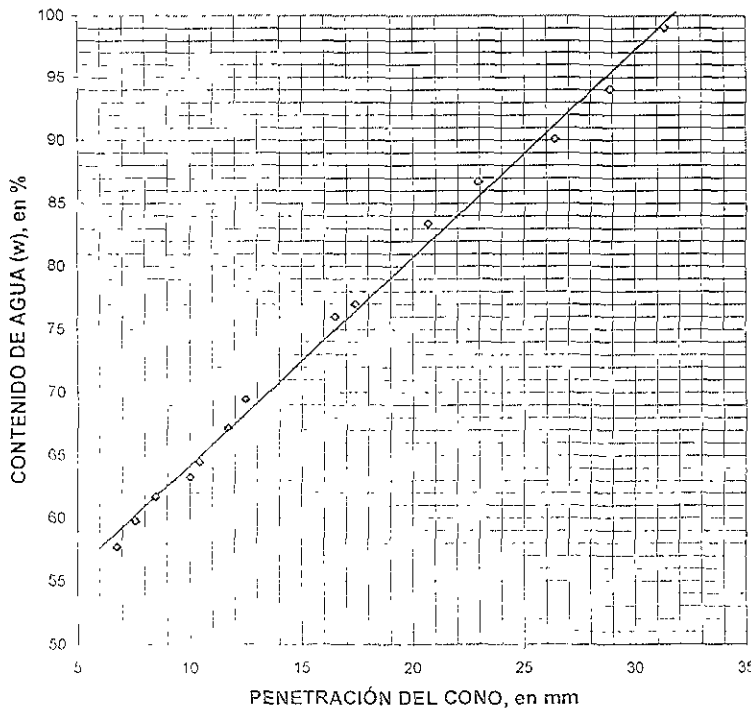


FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

OBRA: TESIS DE LICENCIATURA
LOCALIZACIÓN: FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
SONDEO: _____ MUESTRA _____
PROFUNDIDAD: _____ m
DESCRIPCIÓN: Arcilla Amarilla
(Veracruz)
OPERADOR: FBP FECHA: 06-Feb-01

CONTENIDO DE AGUA NATURAL

PRUEBA	PENETRACIÓN DE CONO INGLÉS	CÁPSULA	PESO DE LA CÁPSULA	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO HÚMEDO	PESO DE CÁPSULA MAS SUELO SECO	PESO DEL AGUA	PESO DEL SUELO SECO	CONTENIDO DE AGUA (ω)
N°	mm	N°	g	g	g	g	g	%
1	6.80	Y-5	108.56	129.13	121.60	7.53	13.04	57.75
2	7.60	F-1	117.04	141.85	132.57	9.28	15.53	59.76
3	8.50	G-2	111.49	131.88	124.10	7.78	12.61	61.70
4	10.00	D-1	117.21	144.60	133.96	10.62	16.77	63.33
5	10.45	B-6	112.73	140.25	129.46	10.79	16.73	64.49
6	11.70	B-2	116.64	139.90	130.55	9.35	13.91	67.22
7	12.50	B-9	117.18	137.60	129.23	8.37	12.05	69.46
8	16.50	A-3	109.97	130.39	121.57	8.82	11.60	76.03
9	17.40	F-7	109.64	132.51	122.56	9.95	12.92	77.01
10	20.70	F-3	109.61	133.07	122.40	10.67	12.79	83.42
11	22.95	Y-0	117.39	140.88	129.97	10.91	12.58	86.72
12	26.40	F-8	118.45	145.60	132.73	12.87	14.28	90.13
13	28.90	C-3	113.50	135.26	124.72	10.56	11.22	94.12
14	31.40	D-9	113.08	134.86	124.02	10.84	10.94	99.09

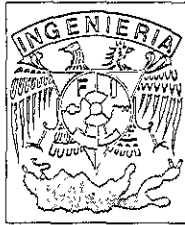


ω = _____ %
LL = 80.70 %
LP = 28.89 %
IP = 51.80 %
Fw = 1.65 %
Cr = _____
Tw = _____

CLASIFICACIÓN DE LA PORCIÓN FINA

S.U.C.S. CH

OBSERVACIONES _____



FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

CLASIFICACION DE SUELOS
CONTENIDO DE AGUA Y
LÍMITES DE CONSISTENCIA

COPA DE CASAGRANDE

OBRA: TESIS DE LICENCIATURA
LOCALIZACIÓN: FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM
SONDEO: _____ MUESTRA: _____
PROFUNDIDAD: _____ m
DESCRIPCIÓN: Barro Oaxaca
OPERADOR: FBP FECHA: 05-Oct-00

CONTENIDO DE AGUA NATURAL

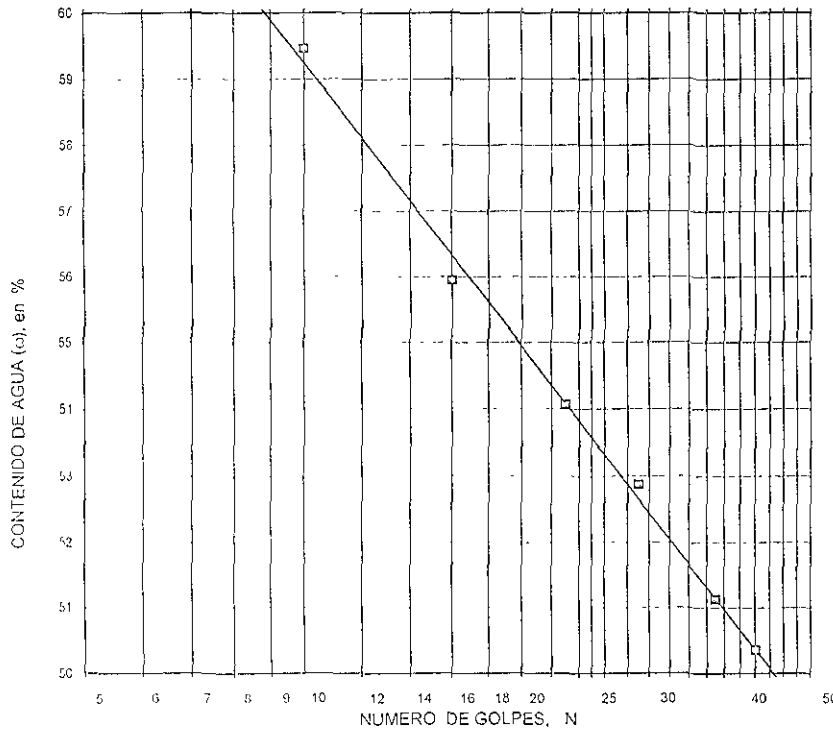
PRUEBA N°	NUMERO DE GOLPES			CAPSULA N°	PESO DE LA CAPSULA g	PESO DE CÁPSULA MÁS SUELO HUMEDO g	PESO DE CÁPSULA MÁS SUELO SECO g	PESO DEL AGUA g	PESO DEL SUELO SECO g	CONTENIDO DE AGUA (w) %
	1°	2°	3°							

LÍMITE PLÁSTICO

1			V-10	38.18	39.16	38.98	0.18	0.80	22.50
2			Z-9	60.31	61.45	61.24	0.21	0.93	22.58
3			B-7	38.05	39.18	38.98	0.20	0.93	21.51

LÍMITE LÍQUIDO

1		10	B-5	59.35	67.69	64.58	3.11	5.23	59.46
2		16	Z-2	60.31	67.92	65.19	2.73	4.88	55.94
3		23	V-7	59.95	66.95	64.50	2.46	4.55	54.07
4		29	U-3	38.09	45.81	43.14	2.67	5.05	52.87
5		37	Z-5	38.12	46.13	43.42	2.71	5.30	51.13
6		42	A-8	60.68	69.10	66.28	2.82	5.60	50.36



w = _____ %
LL = 53.57 %
LP = 22.19 %
IP = 31.38 %
Fw = -14.25 %
Cr = _____
Tw = -2.20

CLASIFICACIÓN DE LA PORCIÓN FINA
S.U.C.S. CH

OBSERVACIONES _____

VI. Análisis de resultados

El cuadro 6.1 es una Carta de Plasticidad de Suelos Finos que apoya la identificación de los suelos de las pruebas realizadas por el método de la Copa de Casagrande y el Cono Inglés. La obtención de los puntos en el cuadro se obtiene conociendo el límite líquido e índice plástico para cada suelo y de cada método.

Se observa que los resultados obtenidos de la Copa de Casagrande reflejan que el Caolín Blanco y la Arcilla Zacatecas son arcillas de baja plasticidad (CL), mientras que los demás suelos son arcillas de alta plasticidad (CH), a excepción de la Arcilla Gris que es un limo de alta plasticidad (MH). Y en el caso del Cono Inglés los ocho tipos de suelos son arcillas de alta plasticidad (CH). Ver el cuadro 6.

Tipo de material	Copa de Casagrande	Cono Inglés
Arcilla Refractaria	CH	CH
Arcilla Gris	MH	CH
Barro Oaxaca	CH	CH
Bentonita Cálcica	CH	CH
Arcilla Zacatecas	CL	CH
Caolín Blanco	CL	CH
Arcilla Café (Ver)	CH	CH
Arcilla Amarilla (Ver)	CH	CH

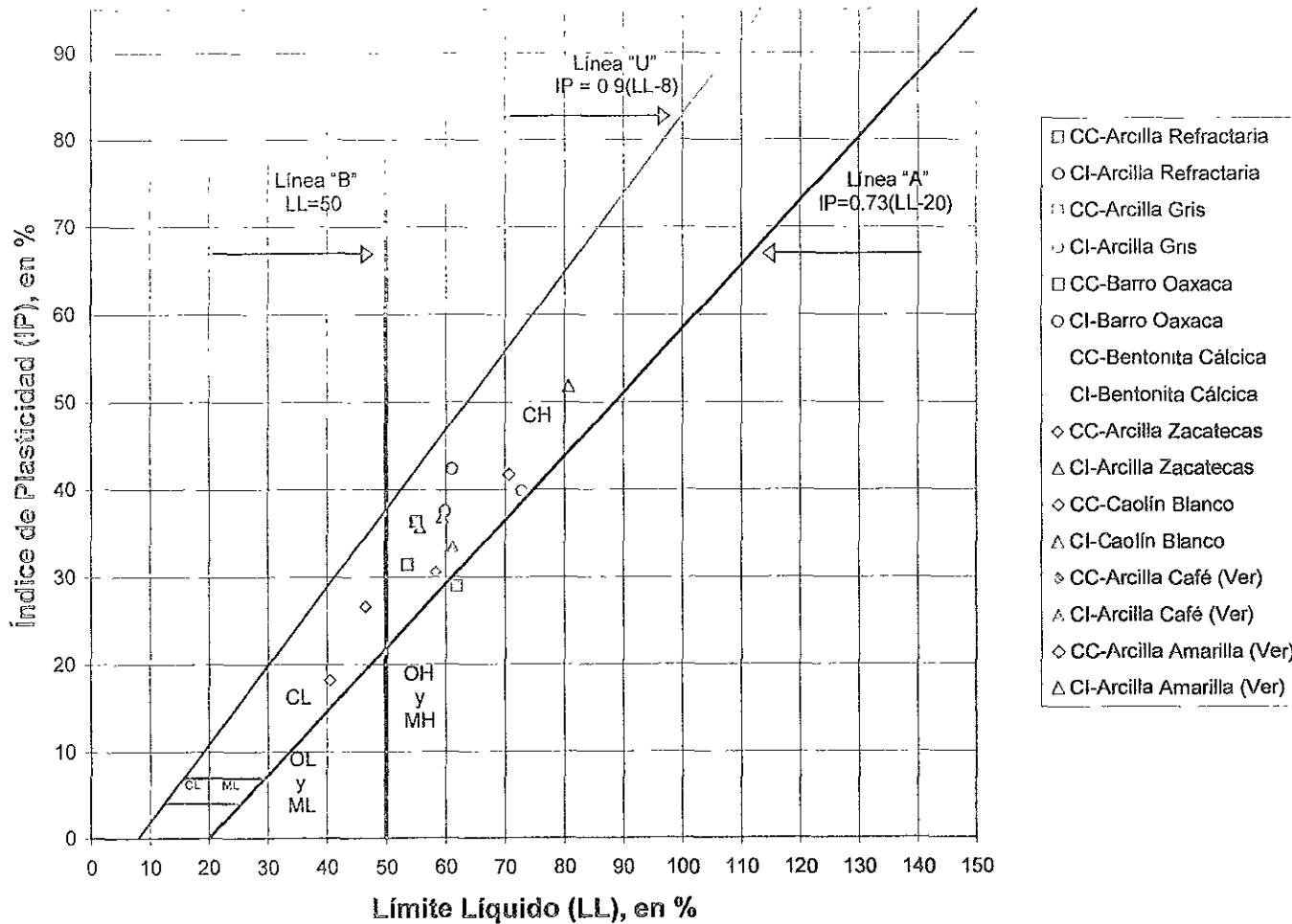
Cuadro 6
Clasificación de los Suelos Finos

El siguiente cuadro (ver cuadro 6.2) que se presenta es una gráfica comparativa entre los métodos utilizados, donde se muestra sobre una línea a 45° el recorrimiento de los suelos debido al método. De este cuadro se puede observar que los resultados de límite líquido con el método del Cono Inglés siempre fueron más altos que los obtenidos con la Copa de Casagrande.

El tercer cuadro (ver cuadro 6.3) se observa que los Límites Líquidos con el Cono Inglés fueron más altos que los obtenidos con la Copa de Casagrande, también la distancia de los puntos a la recta a 45° nos indica la diferencia en porcentaje de Límites Líquidos.

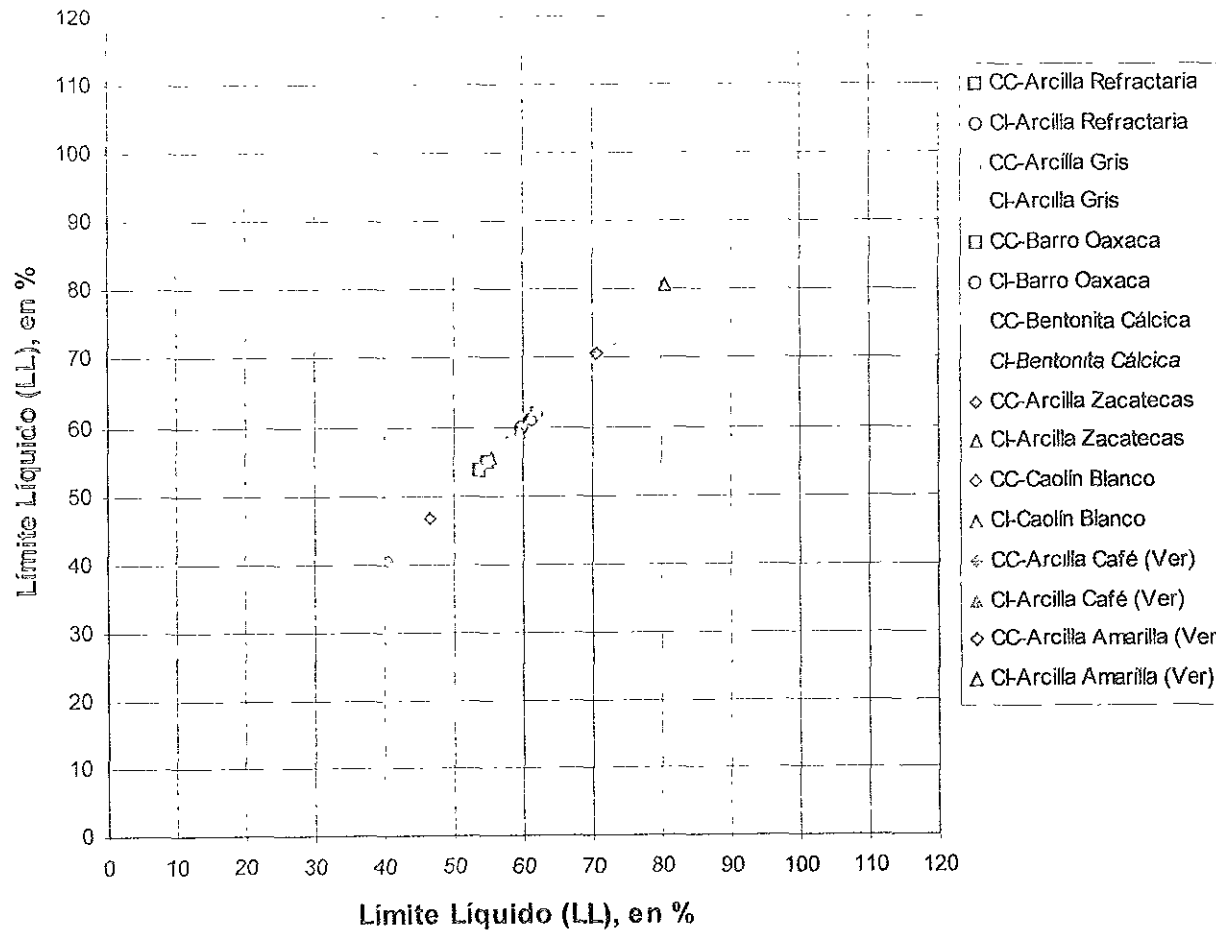
Finalmente en el cuadro 6.4, se presenta una gráfica en tercera dimensión para apreciar de manera más clara la diferencia entre los Límites Líquidos de un suelo por los métodos utilizados en este trabajo. En esta gráfica se observa la gran diferencia en porcentaje para el Caolín Blanco, debido a su naturaleza; este material presentó muchos problemas para la determinación de su Límite Líquido en ambos métodos, ya que su comportamiento es de un secado muy rápido y por esto se tuvo que recurrir a crear un ambiente húmedo. La mayoría de los suelos tienen una diferencia de aproximadamente de entre 6 y 10%.

CARTA DE PLASTICIDAD DE SUELOS FINOS



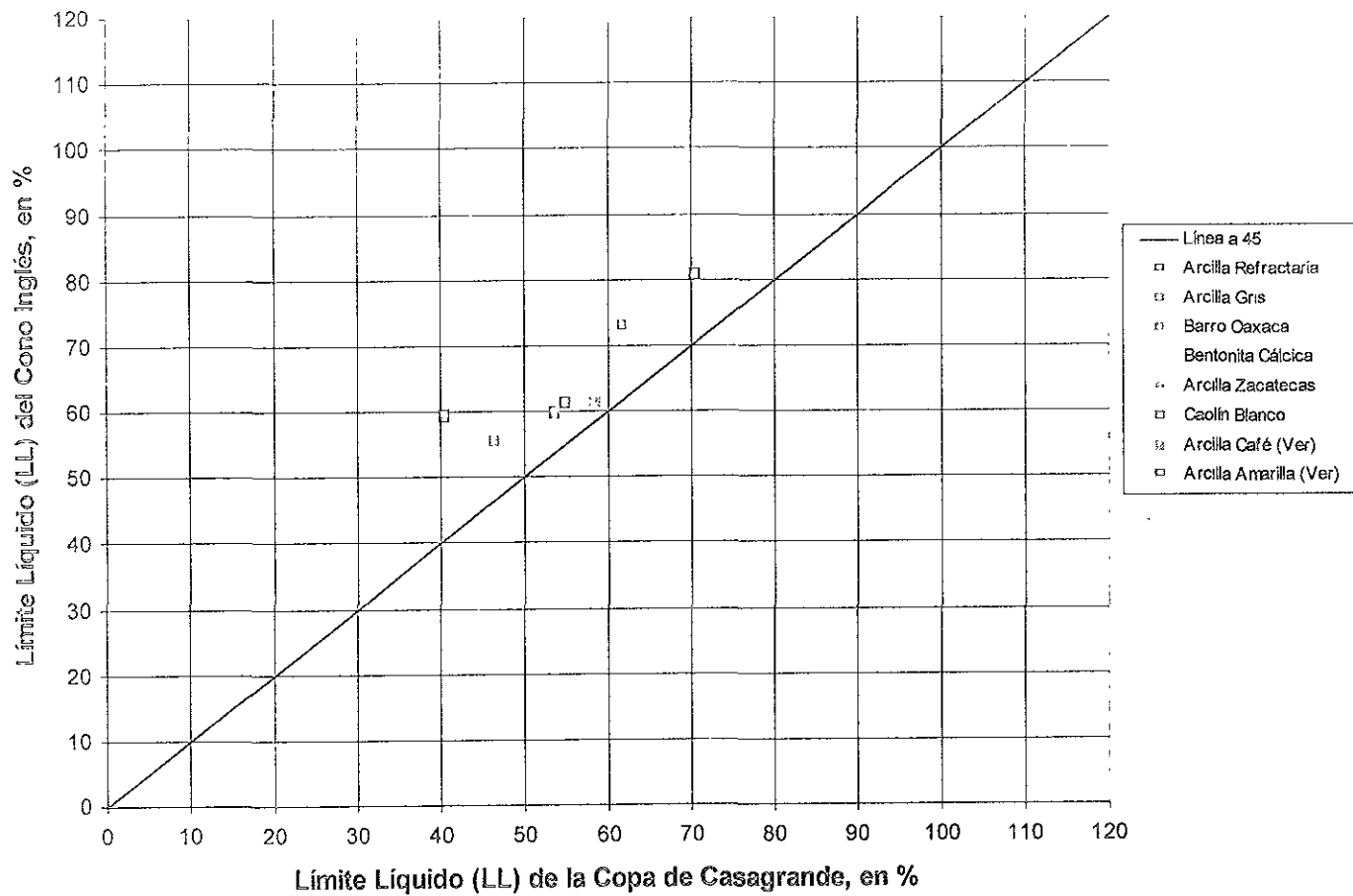
Cuadro 6.1

Gráfica Comparativa de Límite Líquido entre la Copa de Casagrande y el Cono Inglés



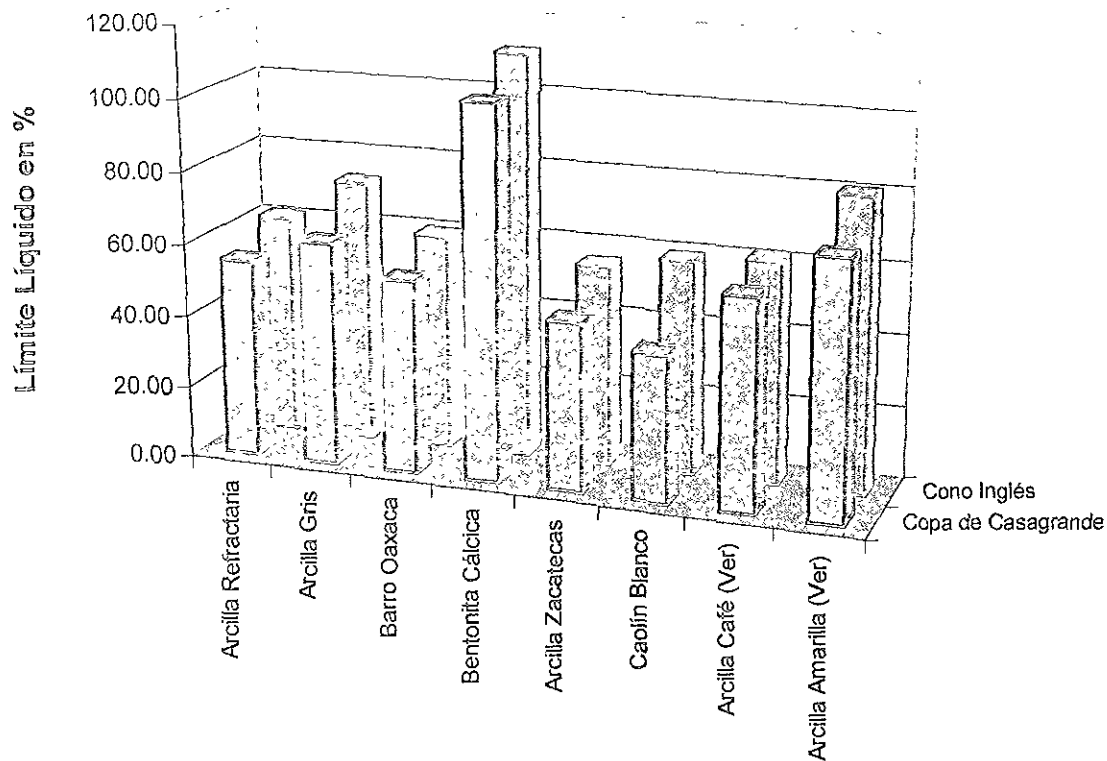
Cuadro 6.2

Gráfica comparativa de Límite Líquido entre la Copa Casagrande y el Cono Inglés



Cuadro 6.3

Gráfica comparativa de Límite Líquido entre la Copa de Casagrande y el Cono Inglés



	Arcilla Refractaria	Arcilla Gris	Barro Oaxaca	Bentonita Cálcica	Arcilla Zacatecas	Caolín Blanco	Arcilla Café (Ver)	Arcilla Amarilla (Ver)
□ Copa de Casagrande	54.94	61.93	53.57	103.00	46.54	40.62	58.34	70.64
▨ Cono Inglés	61.09	72.83	59.85	111.54	55.57	59.37	61.26	80.70

Cuadro 6.4

Conclusiones

La importancia que tienen las arcillas en la vida del hombre hay que recalcarla, ya que sus múltiples aplicaciones hacen capaz a éste de alcanzar nuevos logros, evolucionando la ciencia. Por esta razón es necesario estudiar y clasificar las arcillas de manera amplia y correcta. El conocer las estructuras químicas de las arcillas sirve para entender sus comportamientos cuando están sometidas al intemperismo, sedimentación, sepultación y metamorfismo.

Actualmente se continúa la investigación sobre las arcillas y con el avance tecnológico se ha logrado descifrar a un más su estructura química. Hoy en día se sabe que si conocemos la estructura química de la arcilla podemos comprender su comportamiento, aunque en la mayoría de las arcillas no se encuentran de forma pura, sino acompañadas de impurezas, que pueden llegar a cambiar su comportamiento. Por esto, ya no se habla de la búsqueda de la esencia de la arcilla que años atrás realizaron los científicos.

En México existen grandes yacimientos de arcillas, por lo que es importante continuar la investigación sobre las arcillas en nuestro país, para ampliar su campo de aplicación a favor de un cambio tecnológico que beneficie a México.

La Copa de Casagrande es un dispositivo difícil de operar si no se cuenta con un entrenamiento previo para operarla. Para lograr resultados confiables se requiere de dicho entrenamiento, familiarización con el equipo y constancia por parte del operador. Sin embargo es un dispositivo confiable y pequeño, el cual es fácil de transportar con los cuidados respectivos.

El trabajo con el Cono Inglés fue muy interesante, ya que no se contaba con ningún tipo de metodología implementada en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería (UNAM) para operarlo, debido a que era material recién adquirido. Por lo que una vez teniendo práctica en la operación con la Copa de Casagrande y obteniendo resultados confiables en el cálculo del Límite Líquido con ésta, se comenzó a implementar la metodología para operar el Cono Inglés. Finalmente realizando una análisis comparativo de resultados entre la Copa de Casagrande y el Cono Inglés.

Una vez implementada la metodología para la operación del Cono Inglés, se observó que por la naturaleza del Cono Inglés se disminuye la posibilidad de error por parte del operador, resultando un dispositivo práctico para determinar el Límite Líquido en una forma confiable, su tamaño no lo hace un dispositivo fácil de transportar a comparación de la Copa de Casagrande.

La utilización del Cono Inglés y su puesta en marcha, ayuda a reforzar el objetivo que se tiene a nivel Universidad sobre el plan de mejoramiento constante en los laboratorios; debido a la metodología implementada para operar el Cono Inglés se podrá utilizar un procedimiento y manual de operación de éste.

La norma BS 1377 que rige al Cono Inglés recomienda obtener puntos entre 15 y 25 mm de penetración de la punta, en las pruebas realizadas se observó que este rango lo podemos aumentar de 10 a 27 mm, y los puntos que no están en este rango no son sustanciales para la pruebas.

Los resultados de Límite Líquido con el método del Cono Inglés difieren de un 6 a un 10% aproximadamente más que con el método de la Copa de Casagrande, a excepción del kaolín blanco que presentó un 18.75% debido a la naturaleza de este suelo. Los factores que influyen en los resultados de los métodos son los diferentes principios bajo los cuales trabaja cada método.

El trabajar con la Copa de Casagrande y el Cono Inglés me permitió valorar las ventajas y desventajas de cada dispositivo. Durante el desarrollo de las pruebas observé la facilidad para operar el Cono Inglés, ya que es más rápida la obtención de los puntos y no se requiere un entrenamiento previo como el caso de la Copa de Casagrande, basta con saber remodelar el material, llenar el recipiente cilíndrico correctamente y la operación del Cono.

En los cuadros siguientes, se presenta un comparativo entre las ventajas y desventajas en el uso de la Copa de Casagrande y el Cono Inglés.

Ventajas

Copa de Casagrande	Cono Inglés
1. Es un dispositivo pequeño	1. Se requiere de un mínimo entrenamiento previo, para la operación del equipo
2. Su transportación es sencilla con los respectivos cuidados	2. La obtención del Límite Líquido (LL) se realiza de una manera más rápida
3. Se utiliza poca cantidad de material para la realización de la prueba	3. Su facilidad de operación

Desventajas

Copa de Casagrande	Cono Inglés
1 Necesidad de un entrenamiento previo para la obtención de resultados confiables	1. Se requiere más material en la realización de la prueba, debido al tamaño del recipiente
2 La obtención del Límite Líquido (LL) se realiza de una manera más lenta	2. Se debe cuidar no rayar la punta, ni dejarla caer cuando no esté presente material para la prueba

Varios países se han preocupado por el desarrollo de la tecnología alternativa para la determinación del Límite Líquido como son los conos de penetración; y han tenido buenos resultados. Por esta razón en México es importante el desarrollar un cono de penetración que se adapte a las necesidades de México, debido a que tenemos una gran diversidad de suelos. Un ejemplo es el Cono Sueco que proporciona valores muy similares que la Copa de Casagrande, pero esto se da en suelos suecos.

Tal vez el primer paso para llegar a desarrollar nuestro cono de penetración es hacer una invitación a diferentes Laboratorios de Mecánica de Suelos para que nos apoyen (Facultad de Ingeniería, UNAM) brindando estudios realizados con la Copa de Casagrande y la procedencia del suelo. Así, se formaría una extensa base de datos para poder determinar las características de nuestro futuro cono mexicano

Anexo



Document Summary

Test Method D2216-98 Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass

Copyright 2001 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, West Conshohocken, PA. All rights reserved.

1. Scope

1.1 This test method covers the laboratory determination of the water (moisture) content by mass of soil, rock, and similar materials where the reduction in mass by drying is due to loss of water except as noted in 1.4, 1.5, and 1.7. For simplicity, the word "material" hereinafter also refers to either soil or rock, whichever is most applicable.

1.2 Some disciplines, such as soil science, need to determine water content on the basis of volume. Such determinations are beyond the scope of this test method.

1.3 The water content of a material is defined in 3.2.1.

1.4 The term "solid material" as used in geotechnical engineering is typically assumed to mean naturally occurring mineral particles of soil and rock that are not readily soluble in water. Therefore, the water content of materials containing extraneous matter (such as cement, and the like) may require special treatment or a qualified definition of water content. In addition, some organic materials may be decomposed by oven drying at the standard drying temperature for this method (110°C). Materials containing gypsum (calcium sulfate dihydrate or other compounds having significant amounts of hydrated water) may present a special problem as this material slowly dehydrates at the standard drying temperature (110°C) and at very low relative humidities, forming a compound (calcium sulfate hemihydrate) which is not normally present in natural materials except in some desert soils. In order to reduce the degree of dehydration of gypsum in those materials containing gypsum, or to reduce decomposition in highly organic soils, it may be desirable to dry these materials at 60°C or in a desiccator at room temperature. Thus, when a drying temperature is used which is different from the standard drying temperature as defined by this test method, the resulting water content may be different from standard water content determined at the standard drying temperature.

Note 1-Test Methods D2974 provides an alternate procedure for determining water content of peat materials.

1.5 Materials containing water with substantial amounts of soluble solids (such as salt in the case of marine sediments) when tested by this method will give a mass of solids which includes the previously soluble solids. These materials require special treatment to remove or account for the presence of precipitated solids in the dry mass of the specimen, or a qualified definition of water content must be

used.

1.6 This test method requires several hours for proper drying of the water content specimen. Test Method D4643 provides for drying of the test specimen in a microwave oven which is a shorter process.

1.7 This standard requires the drying of material in an oven at high temperatures. If the material being dried is contaminated with certain chemicals, health and safety hazards can exist. Therefore, this standard should not be used in determining the water content of contaminated soils unless adequate health and safety precautions are taken.

1.8 This standard does not purport to address all of the safety problems, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.>

2. Referenced Documents

D2974 Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils

D4220 Practice for Preserving and Transporting Soil Samples

D4318 Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils

D4643 Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Microwave Oven Method

D4753 Specification for Evaluating, Selecting, and Specifying Balances and Scales for Use in Soil and Rock Testing

D6026 Guide for Using Significant Digits in Calculating and Reporting Geotechnical Test Data

D653 Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluids

E145 Specification for Gravity-Convection And Forced-Ventilation Ovens

Index Terms

Aggregate-soil-aggregate; Consistency; Earthwork; Embankments; Heating tests-soil/rock; Index property; Laboratory-soil/rock analysis; Moisture analysis-rock; Moisture analysis-soil/related materials; Rock; Soil-aggregate, Water content-rock; Water content-soil; water (moisture) content-soil/rock/soil-aggregate mixtures, laboratory; test



Document Summary

Test Method D4959-00 Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil By Direct Heating

Copyright 2001 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, West Conshohocken, PA. All rights reserved.

1. Scope

1.1 This test method covers procedures for determining the water (moisture) content of soils by drying with direct heat, such as using a hotplate, stove, blowtorch, etc.

1.2 This test method is not intended as a replacement for Method D2216 but rather as a substitute when more rapid and less accurate results are acceptable or desired to expedite other phases of testing. Method D2216 is to be used as the method to compare for accuracy checks and correction.

1.3 When questions of accuracy between this test method and Method D2216 arise, Method D2216 shall be the referee method.

1.4 This test method is applicable for most soil types. For some soils, such as those containing significant amounts of halloysite, mica, montmorillonite, gypsum, or other hydrated materials, highly organic soils or soils that contain dissolved solids, (such as salt in the case of marine deposits), this test method may not yield reliable water content values.

1.5 The values stated in SI units are to be regarded as standard.

1.6 This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety problems associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

2. Referenced Documents

D2216 Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock

D3740 Practice for Minimum Requirements for Agencies Engaged in the Testing and/or Inspection of Soil and Rock as Used in Engineering Design and Construction

D4753 Specification for Evaluating, Selecting, and Specifying Balances and Scales for Use in Testing Soil, Rock, and Related Construction Materials

D353 Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluids

Index Terms

acceptance tests; compaction control; density; direct heating; laboratory moisture tests; moisture content; moisture control; quality control; rapid method; soil moisture; test procedure



Index of Summary

**Test Method D4318-00 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils**

Copyright 2001 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, West Conshohocken, PA. All rights reserved.

1. Scope

1.1 These test methods cover the determination of the liquid limit, plastic limit, and the plasticity index of soils as defined in Section 3 on Terminology.

1.2 Two methods for preparing test specimens are provided as follows: *Wet preparation method*, as described in 10.1. *Dry preparation method*, as described in 10.2. The method to be used shall be specified by the requesting authority. If no method is specified, use the wet preparation method.

1.2.1 The liquid and plastic limits of many soils that have been allowed to dry before testing may be considerably different from values obtained on non-dried samples. If the liquid and plastic limits of soils are used to correlate or estimate the engineering behavior of soils in their natural moist state, samples should not be permitted to dry before testing unless data on dried samples are specifically desired.

1.3 Two methods for determining the liquid limit are provided as follows: *Method A*, Multipoint test as described in Sections 11 and 12. *Method B*, One-point test as described in Sections 13 and 14. The method to be used shall be specified by the requesting authority. If no method is specified, use Method A.

1.3.1 The multipoint liquid limit method is generally more precise than the one-point method. It is recommended that the multipoint method be used in cases where test results may be subject to dispute, or where greater precision is required.

1.3.2 Because the one-point method requires the operator to judge when the test specimen is approximately at its liquid limit, it is particularly not recommended for use by inexperienced operators.

1.3.3 The correlation on which the calculations of the one-point method are based may not be valid for certain soils, such as organic soils or soils from a marine environment. It is strongly recommended that the liquid limit of these soils be determined by the multipoint method.

1.4 The plastic limit test is performed on material prepared for the liquid limit test.

1.5 The liquid limit and plastic limit of soils (along with the shrinkage limit) are often collectively referred to as the Atterberg limits. These limits distinguished the boundaries of the several consistency states of plastic soils.

1.6 The composition and concentration of soluble salts in a soil affect the values of

the liquid and plastic limits as well as the water content values of soils (see Method D2216). Special consideration should therefore be given to soils from a marine environment or other sources where high soluble salt concentrations may be present. The degree to which the salts present in these soils are diluted or concentrated must be given careful consideration.

1.7 The methods described herein are performed only on that portion of a soil that passes the 425-um (No. 40) sieve. Therefore, the relative contribution of this portion of the soil to the properties of the sample as a whole must be considered when using these tests to evaluate properties of a soil.

1.8 The values stated in acceptable metric units are to be regarded as the standard, except as noted below. The values given in parentheses are for information only.

1.8.1 The standard units for the resilience tester covered in Annex A1 are inch-pound, not metric. The metric values given are for information only.

This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

2. Referenced Documents

C702 Practice for Reducing Field Samples of Aggregate to Testing Size

D1241 Specification for Materials for Soil-Aggregate Subbase, Base, and Surface Courses

D2216 Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass

D2487 Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)

D3282 Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes

D3740 Practice for Minimum Requirements for Agencies Engaged in the Testing and/or Inspection of Soil and Rock as Used in Engineering Design and Construction

D420 Guide to Site Characterization for Engineering, Design, and Construction Purposes

D4753 Specification for Evaluating, Selecting, and Specifying Balances and Scales for Use in Soil, Rock, and Related Construction Materials Testing

D6026 Practice for Using Significant Digits in Geotechnical Data

D653 Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluids

D75 Practice for Sampling Aggregates

E11 Specification for Wire-Cloth Sieves for Testing Purposes

E177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods

E691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

Index Terms

activity; Atterberg limits; liquid limit; plasticity index; plastic limit



Document Summary

Test Method D4643-00 Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Microwave Oven Method

Copyright 2001 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, West Conshohocken, PA. All rights reserved.

1. Scope

1.1 This test method outlines procedures for determining the water (moisture) content of soils by incrementally drying soil in a microwave oven.

1.2 This test method is not intended as a replacement for Test Method D2216; but, rather as a supplement when more rapid results are required or desired to expedite other phases of testing. Test Method D2216 is to be used as the method to compare for accuracy checks and correction.

1.3 When questions of accuracy between this test method and Test Method D2216 arise, Test Method D2216 shall be the referee method.

1.4 This test method is applicable for most soil types. For some soils, such as those containing significant amounts of halloysite, mica, montmorillonite, gypsum or other hydrated materials, highly organic soils, or soils in which the pore water contains dissolved solids (such as salt in the case of marine deposits), this test method may not yield reliable water content values.

1.5 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

1.6 This standard does not purport to address all of the safety problems, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. See Section 7.

Note 1-Notwithstanding statements of precision and bias contained in this standard, the precision of this test method is dependent on the competence of the personnel performing it and the suitability of the equipment and facilities used. Agencies that meet the criteria of Practice D3740 are generally considered capable of competent and objective testing. Users of this test method are cautioned that compliance with Practice D3740 does not in itself ensure reliable testing. Reliable testing depends on many factors; Practice D3740 provides a means of evaluating some of those factors.

2. Referenced Documents

D2216 Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock

D3740 Practice for Minimum Requirements for Agencies Engaged in the Testing and/or Inspection of Soil and Rock as Used in Engineering Design and Construction

D4753 Specification for Evaluating, Selecting, and Specifying Balances and Scales for Use in Testing Soil, Rock, and Related Construction Materials

D653 Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluids

Index Terms

microwave; microwave moisture; microwave oven; moisture content; rapid moisture test; water content

BS 1377: Part 2: 1990**4.3 Cone penetrometer method (definitive method)**

4.3.1 General. This method covers the determination of the liquid limit of a sample of soil in its natural state, or of a sample of soil from which material retained on a 425 μm test sieve has been removed.

NOTE. The method using the cone penetrometer is preferred to that employing the Casagrande apparatus (see 4.5), as the test is both easier to carry out and is capable of giving more reproducible results. The cone penetrometer apparatus is easier to maintain in correct adjustment and the test procedure is less dependent on the judgment of the operator. The results obtained with the cone penetrometer may differ slightly from those with the Casagrande apparatus, but in most cases up to a liquid limit of 100 these differences will not be significant and will be less than the normal variations likely obtained using the Casagrande apparatus.

The requirements of Part 1 of this standard, where appropriate shall apply to this method.

4.3.2 Apparatus

4.3.2.1 A flat, glass plate, of which a convenient size is 10 mm thick and about 500 mm square.

4.3.2.2 Two palette knives or spatulas.

4.3.2.3 A penetrometer as used in bituminous material testing complying BS2000: Part 49.

4.3.2.4 A cone of stainless steel or duralumin approximately 35 mm long, with a smooth, polished surface and an angle of $30 \pm 1^\circ$. To ensure that the point remains sufficiently sharp for the purposes of the test, the cone shall be replaced if, after continued use, the point can no longer be felt when brushed lightly with the tip of the finger when the tip of the cone is pushed through a hole 1.5 ± 0.02 mm in diameter, bored through a metal plate 1.75 ± 0.1 mm thick. The mass of the cone together with its sliding shaft shall be 80.00 ± 0.1 g (see figure 1).

NOTE. The effect of surface roughness is more significant than small variations in cone angle or bluntness of the tip.

4.3.2.5 One or more metal cups not less than 55 mm in diameter and 40 mm deep with the rim parallel to the flat base.

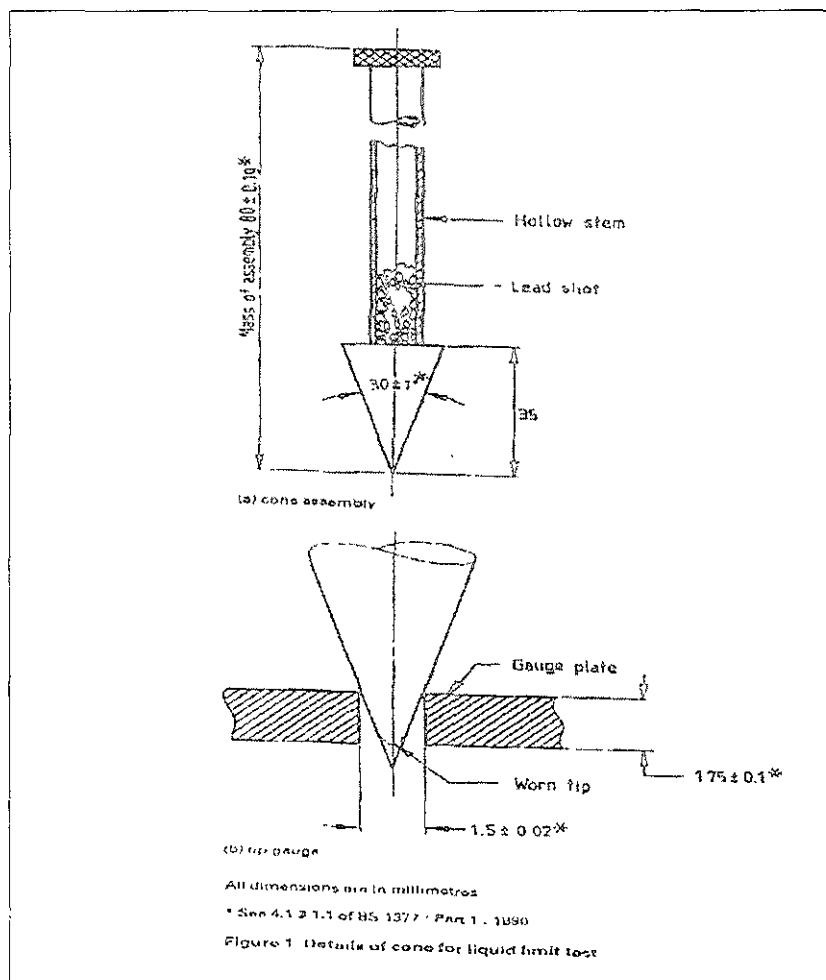
4.3.2.6 An evaporating dish, of about 150 mm diameter.

4.3.2.7 Apparatus for moisture content determination as specified in 3.2.2.

4.3.2.8 A wash bottle or beaker, containing distilled water complying with 5.1 of Part 1 of this standard.

4.3.2.9 A corrosion-resistant airtight container.

- 4.3.2.10 A metal straightedge about 100 mm long on a straight-bladed spatula.
 4.3.2.11 A stopclock or stopwatch readable to 1 s.



4.3.3 Procedure

4.3.3.1 Take a sample of about 300 g from the soil paste prepared as specified in 4.2.3 (natural condition) or 4.2.4 (sieved soil) and place it on the glass plate.

4.3.3.2 Mix the paste for at least 10 min using the two palette knives. If necessary add more distilled water so that the first cone penetration reading is about 15 mm.

NOTE. Some soils, e.g. clays of high plasticity and residual soils, may require up to 40 min of continuous mixing immediately before testing to obtain reliable results. If in doubt comparative tests should be carried out.

4.3.3.3 Push a portion of the mixed soil into the cup with a palette knife taking care not to trap air. Strike off excess soil with the straightedge to give a smooth level surface.

4.3.3.4 With the penetration cone locked in the raised position lower the supporting assembly so that the tip of the cone just touches the surface of the soil. When the cone is in the correct position a slight movement of the cup will just mark the soil surface. Lower

the stem of the dial gauge to contact the cone shaft and record the reading of the dial gauge to the nearest 0.1 mm.

4.3.3.5 Release the cone for a period of 5 ± 1 s. If the apparatus is not fitted with an automatic release and locking device take care not to jerk the apparatus during this operation. After locking the cone in position lower the stem of the dial gauge to contact the cone shaft and record the reading of the dial gauge to the nearest 0.1 mm. Record the difference between the beginning and end of the drop as the cone penetration.

4.3.3.6 Lift out the cone and clean it carefully to avoid scratching.

4.3.3.7 Add a little more wet soil to the cup, taking care not to trap air, make the surface smooth as in 4.3.3.3 and repeat 4.3.3.4 to 4.3.3.6.

4.3.3.8 If the difference between the first and second penetration readings is less than 0.5 mm record the average of the two penetrations and proceed to 4.3.3.9.

If the second penetration is more than 0.5 mm and less than 1 mm different from the first, carry out a third test. If the overall range is then not more than 1 mm record the average of the three penetrations and proceed to 4.3.3.9.

If the overall range is more than 1 mm remove the soil from the cup, remix and repeat 4.3.3.3 to 4.3.3.8 until consistent results are obtained and then proceed to 4.3.3.9.

4.3.3.9 Take a moisture content sample about 10 g from the area penetrated by the cone and determine the moisture contents as specified in 3.2.

4.3.3.10 Repeat 4.3.3.3 to 4.3.3.9 at least three more times using the same sample of soil to which further increments of distilled water have been added. Proceed from the drier to the wetter condition of the soil. The amount of water added shall be such that a range of penetration values of approximately 15 mm to 25 mm is covered by the four or more test runs and is evenly distributed. Each time soil is removed from the cup for the addition of water, wash and dry the cup.

4.3.3.11 If at any time during the above procedure the soil has to be left for a while on the glass plate cover the soil with the evaporating dish or a damp cloth to prevent the soil drying out.

4.3.4 Calculations and expression of results (See form 2.C of appendix A)

4.3.4.1 Calculate the moisture content of each test specimen as specified in 3.2.

4.3.4.2 Plot the relationship between moisture content and cone penetration with the percentage moisture contents as abscissas and the cone penetrations as ordinates, both on linear scales.

4.3.4.3 Draw the best straight line fitting the plotted points.

4.3.4.4 From the linear graph read off the moisture content corresponding to a cone penetration of 20 mm to one decimal place.

4.3.4.5 Express the moisture content corresponding to a cone penetration of 20 mm to the nearest whole number and report it as the liquid limit (W_L) of the soil sample.

4.3.4.6 Express the percentage of material passing the 425 μm test sieve correct to the nearest whole number (see 4.2.5)

4.3.5 Test report The test report shall affirm that the test was carried out in accordance with BS 1377: Part 2: 1990 and shall contain the following information:

- a) the method of test used;
- b) the liquid limit;
- c) the percentage of material passing the 425 μm test sieve;
- d) the history of the material, e.g. whether tested in the natural state, or after wet sieving or after any other process;
- e) the information required by clause 9 of BS 1377: Part 1: 1990.

4.4 One-point cone penetrometer method

4.4.1 General. This method enables the liquid limit of a soil sample to be determined from only one measurement of moisture content. This method enables a result to be obtained when only a small amount of soil is available.

NOTE₁. The one-point method using the cone penetrometer is likely to give results that are less reliable than those obtained from the four-point method (see 4.3), and is therefore suitable only where a possibly less accurate result acceptable.

NOTE₂. If it is suspected that the liquid limit is higher than about 120 % the method specified in 4.3 should be followed using the appropriate size of sample.

The requirements of Part 1 of this standard, where appropriate, shall apply to this test method.

4.4.2 Apparatus. The apparatus shall be the same as that specified in 4.3.2.

4.4.3 Procedure

4.4.3.1 Take a sample of about 100 g from the soil paste prepared as specified in 4.2.3 (natural condition) or 4.2.4 (sieved soil) and place it on the glass plate.

NOTE For many soils the influence of curtailing or omitting the curing time introduces errors that are unlikely to be greater than those inherent in this rapid procedure.

4.4.3.2 Thoroughly mix the paste with distilled water using the two palette knives. Adjust the moisture content to that corresponding to a cone penetration of between 15 mm and 25 mm, and as close as possible to 20 mm. This may be checked with the cone penetrometer device if necessary. Mix for at least 10 min.

NOTE Some soils e.g. clays of high plasticity and residual soils, may require up to 40 min of continuous mixing immediately before testing to obtain reliable results. If in doubt, comparative tests should be carried out.

4.4.3.3 Push a portion of the mixed soil into the cup with a palette knife, taking care not to trap air. Strike off excess soil with a straightedge to give a smooth surface.

4.4.3.4 With the cone locked in the raised position lower the supporting assembly so that the tip of the cone just touches the surface of the soil. When the cone is in the correct

position a slight movement of the cup will just mark the soil surface. Record the reading of the dial gauge to the nearest 0.1 mm.

4.4.3.5 Release the cone for a period of 5 ± 1 s. If the apparatus is not fitted with an automatic release and locking device take care not to jerk the apparatus during this operation. After locking the cone in position lower the stem of the dial gauge to contact the cone shaft and record the reading of the dial gauge to the nearest 0.1 mm. Record the difference between the beginning and end of the drop as the cone penetration.

4.4.3.6 Lift out the cone and clean it carefully to avoid scratching.

4.4.3.7 Add a little more wet soil to the cup, taking care not to trap air, make the surface smooth as in 4.4.3.3 and repeat 4.4.3.4 to 4.4.3.6.

4.4.3.8 Repeat 4.4.3.4 to 4.4.3.7 until two consecutive tests give cone penetration readings within 0.5 mm

4.4.3.9 Remove the bulk of the soil, including the zone penetrated by the cone, from the cup. Place it in a suitable container and determine its moisture content as specified in 3.2.

4.4.4 Calculations and expressions of results. Calculate the moisture content of the test sample as specified in 3.2 and express the result to the first decimal place. Obtain the factor corresponding to the cone penetration and the moisture content range from table 1. Calculate the liquid limit from the equation:

$$\text{liquid limit} = \text{moisture content} \times \text{factor}$$

and express the result to the nearest whole number.

4.4.5 Test report. The test report shall affirm that the test was carried out in accordance with BS 1377: Part 2: 1990 and shall contain the following information:

- a) the method of test used;
- b) the liquid limit;
- c) the percentage of material passing the 425 μm test sieve;
- d) the history of the material, e.g. whether tested in the natural state, or after wet sieving or after any other process;
- e) the information required by clause 9 of BS 1377: Part 1: 1990.

Table 1. Factors for one-point cone penetrometer liquid limit test*			
Cone penetration	Factors for moisture content ranges		
	below 25 %	25 % to 50 %	above 50 %
mm			
15	1.057	1.024	1.028
16	1.052	1.076	1.075
17	1.042	1.068	1.055
18	1.030	1.039	1.028
19	1.015	1.020	1.012
20	1.000	1.000	1.000
21	0.984	0.984	0.984
22	0.971	0.968	0.967
23	0.961	0.954	0.949
24	0.955	0.943	0.929
25	0.954	0.934	0.909
Plasticity	low	intermediate	high

*Reference: Clayton and Jukoa, 1979

Bibliografía

Alonso, M & Finn, E (1995): *Física*. Addison-Wesley Iberoamericana.

ASTM (1998). *Test Method D2216-98 Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. Standard D2216-98. Vol 04.08. West Conshohocken, PA..

ASTM (2000): *Test Method D4318-00 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. Standard D4318-00. Vol 04.08. West Conshohocken, PA.

ASTM (2000): *Test Method D4643-00 Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Microwave Oven Method*. Standard D4643-00. Vol 04.08. West Conshohocken, PA..

ASTM (2000): *Test Method D4959-00 Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil By Direct Heating*. Standard D4959. Vol 04.08. West Conshohocken, PA..

Besoain, Eduardo. (1985): *Mineralogía de Arcillas de Suelos*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

BS (1990): *Cone Penetrometer Method (Definitive Method)*. British Standard 1377. Part 2

Chang, Raymond (1992): *Química* McGraw Hill.

Charles, Rich. (1964) *Soil Clay Mineralogy: A Symposium* Chapel Hill. University of North Carolina

Comisión Nacional del Agua (CNA). (1990): *Mecánica de Suelos: Instructivo para Ensayo de Suelos*. Colección Breviarios del Agua Comisión Nacional del Agua.

Domínguez, José M (1992) *Las Arcillas*. FCE & CONACYT.

Grim, Ralph E (1962) *Applied Clay Mineralogy*. International Series in the Earth & Planetary Sciences Mc Graw Hill

- Hillel, D (1971): *Soil and Water Physical Principles and Proceses*. Academic Press
- Holtz, Robert D. (1981): *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice-Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics Series. Prentice Hall.
- Juárez, Eulalio. (1998): *Mecánica de Suelos*. Tomo 1. Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Limusa Noriega.
- McCarthy, David F. (1998): *Essentials of Soil Mechanics and Foundations. Basic Geotechnics*. Prentice Hall.
- Mondadori, Arnoldo Editore, S.a.A. (1997): *Guía de Minerales y Rocas*. Grijalbo.
- Roberts, Jack (1995) *Understanding Soils Mechanics*. Delmar Publishers.
- Saborio, U & Zárate, A (1964): *Estudio, Experiencias y Comparación de Algunos Métodos de Control Rápido de la Compactación y la Humedad en Terraplenes*. Publicación de la Secretaría de Obras Públicas de México.
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos & Instituto de Ingeniería. UNAM (1998): *Vocabulario de Mecánica de Suelos. Términos usados en Latinoamérica*. Limusa.
- Sowers (1994): *Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. Limusa-Noriega Editores.
- Spangler, Merlin G (1982): *Soil Engineering*. Harper & Row, Publishers.
- Tarbuk & Lutgens (1999). *Ciencias de la Tierra una Introducción a la Geología Física*. Prentice Hall
- Velde, B (1992): *Introduction to Clay Minerals: Chemistry, Origins, Uses, and Environmental Significance*. Chapman & Hall.
- Villarreal, F, Butrulle, D & Rivas, J (1980): *Introducción a la Nomenclatura Química* Trillas
- Wood D M (1990) *Soil Behavior an Critical State Soil Mechanics*. Cambridge University Press