

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL



**“Clasificación de Arcillas presentes en los bancos de
Guatajiagua, departamento de Morazán, y Facultad
Multidisciplinaria Oriental”**

PRESENTADO POR:
RENÉ ARTURO GARAY DÍAZ
MIGUEL ENRIQUE MENA GÓMEZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, AGOSTO DEL 2007.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTORA:

DRA. MARÍA ISABEL RODRÍGUEZ

SECRETARIA GENERAL:

LICDA. ALICIA MARGARITA RIVAS DE RECINOS

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIO:

ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DIRECTOR:

ING. LUIS RODOLFO NOSIGLIA DURÁN

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO CIVIL

Título:

**“Clasificación de Arcillas presentes en los bancos de
Guatajiagua, departamento de Morazán, y Facultad
Multidisciplinaria Oriental”**

Presentado por:

**RENÉ ARTURO GARAY DÍAZ
MIGUEL ENRIQUE MENA GÓMEZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores:

**INGRA. LESLY EMIDALIA MENDOZA MEJÍA.
LICDA. AIDA BÉNDIX SANTANA DE ZAMORA**

SAN SALVADOR, AGOSTO DEL 2007.

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores:

INGRA. LESLY EMIDALIA MENDOZA MEJÍA.

LICDA. AIDA BÉNDIX SANTANA DE ZAMORA

AGRADECIMIENTOS:

Le dedico este logro primeramente a Dios todopoderoso, pues si él ninguna de mis metas trazadas se hubiesen hecho realidad.

A mis padres René A. Garay y Maria Ruth Díaz de Garay, que con todo su amor y dedicación me han dado todo lo que se les fue posible, sin ustedes yo simplemente no existiría; solo puedo decirles “gracias”.

A mis hermanos Juan Garay y Elizabeth Garay, con ustedes he aprendido a que se disfruta, se aprende y se vive mejor compartiendo; por eso especialmente comparto este logro; a la vez que sea un incentivo para que también puedan finalizar sus carreras y las disfrutemos siempre juntos.

A mis maestros, en especial, a Ing. Lesly Mendoza y Lcda. Aida Santana; que con sus enseñanzas, esfuerzo y paciencia se pudo lograr terminar la investigación.

Y a todas esas personas que por falta de tiempo y espacio no puedo mencionar, pero que están muy cerca de mi corazón, cada quien agarre su parte.

RENÉ ARTURO GARAY DÍAZ.

AGRADECIMIENTOS:

Como casi todo el mundo deseo agradecerle en primer lugar a Dios.

A mi queridísima y loca familia.

A mis fieles amig@s.

A mi estupenda novia.

A mis dos lindas asesoras.

A mi gran compañero de tesis.

A todos los que me ayudaron y me siguen ayudando a dar este otro paso.

A los que me negaron su ayuda porque me impulsaron a superar obstáculos.

Gracias por todo lo que han hecho por mí, cada uno de una forma muy especial e inolvidable.

MIGUEL ENRIQUE MENA GÓMEZ.

ÍNDICE.

CONTENIDO	Pág.
CAPÍTULO I: ANTEPROYECTO.	
1.1 <i>Introducción</i>	I
1.2 <i>Antecedentes</i>	II
1.3 <i>Planteamiento del problema</i>	IV
1.4 <i>Objetivos</i>	VI
1.5 <i>Alcances</i>	VIII
1.6 <i>Limitaciones</i>	IX
1.7 <i>Justificación</i>	X
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.	
2.1 <i>Origen de las arcillas</i>	1
2.2 <i>composición mineralógica de los suelos arcillosos</i> <i>(Mineralogía de las arcillas)</i>	7
2.3 <i>Minerales no arcillosos</i>	39
2.4 <i>Consistencia del suelo</i>	53

<i>2.5 Exploración del subsuelo.....</i>	80
<i>2.6 Metodología de análisis para la clasificación de arcillas.....</i>	96

CAPÍTULO III: RECONOCIMIENTO DEL ÁREA EN
ESTUDIO Y EXTRACCIÓN DE MUESTRAS
ALTERADAS

<i>3.1 Reconocimiento del área y descripción de los sitios en estudio.....</i>	106
<i>3.1.1. Sitio: Guatajiagua.....</i>	106
<i>3.1.2 Sitio: San Miguel.....</i>	111
<i>3.2 Metodología utilizada en campo para la extracción de muestras.....</i>	113
<i>3.2.1 Sitio: Guatajiagua.....</i>	113
<i>3.2.2 Sitio: San Miguel.....</i>	117

CAPÍTULO IV: ENSAYOS DE LABORATORIOS EN LAS
ARCILLAS

<i>4.1 Prueba de difracción de Rayos “X”</i>	120
<i>4.1.1 Descripción del equipo</i>	120
<i>4.1.1.1 Generador de potencial constante</i> <i>PW1730/00</i>	121
<i>4.1.1.2 Sistema de enfriamiento de agua</i>	124
<i>4.1.1.3 La torre de tubo para difracción de los</i> <i>Rayos “X” PW1316/91</i>	125
<i>4.1.1.4 Goniómetro horizontal PW1380</i>	126
<i>4.1.2 Procedimiento para realizar el ensayo</i>	129
<i>4.1.3 Presentación de los resultados</i>	135
<i>4.2 Estados de consistencia de los suelos: Ensayo de</i> <i>límites de plasticidad ó límites de Atterberg (A.S.T.M. D</i> <i>4318-00)</i>	137
<i>4.2.1 Límite líquido</i>	137
<i>4.2.1.1 Alcance de la prueba</i>	137
<i>4.2.1.2 Descripción del equipo</i>	138

4.2.1.3 Procedimiento para realizar el ensayo.....	145
4.2.1.4 Presentación de los resultados.....	159
4.2.2 Límite plástico.....	161
4.2.2.1 Alcance de la prueba.....	161
4.2.2.2 Descripción del equipo.....	162
4.2.2.3 Procedimiento para realizar el ensayo.....	162
4.2.2.4 Presentación de los resultados.....	165
4.2.2.5 Índice de plasticidad.....	167
4.2.3 Límite de contracción.....	168
4.2.3.1 Alcance de la prueba.....	168
4.2.3.2 Descripción del equipo.....	168
4.2.3.3 Procedimiento para realizar el ensayo.....	170
4.2.3.4 Presentación de los resultados.....	182

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

5.1 Prueba de difracción de Rayos “X”.....	184
5.2.1 Minerales arcillosos encontrados en las	190

<i>muestras de San Miguel.....</i>	
5.2.2 <i>Minerales arcillosos encontrados en las</i>	
<i>muestras</i>	<i>de</i>
<i>Guatajagua.....</i>	198
5.2.3 <i>Descripción de los minerales arcillosos.....</i>	207
5.2.3.1 <i>Grupo de las Esmectitas.....</i>	207
5.2.3.1.1 <i>Grupo de las Esmectitas dioctaédricas.</i>	208
5.2.3.1.2 <i>Grupo Esmectitas Trioctaédricas.....</i>	211
5.2.3.2 <i>Grupo Cloritas.....</i>	212
5.2.3.3 <i>Grupo Caolinitas.....</i>	214
5.2.3.4 <i>Grupo de las Illitas.....</i>	217
5.3 <i>Estados de consistencia de los suelos: Ensayos de</i>	
<i>límites de plasticidad o Límites de consistencia.....</i>	219
5.4 <i>Correlación de resultados prueba de Difracción de</i>	
<i>Rayos “X” y Límites de Consistencia.....</i>	223
<i>Conclusiones.....</i>	231
<i>Recomendaciones.....</i>	238
<i>Bibliografía.....</i>	243

INTRODUCCIÓN.

El presente documento es el resultado de un estudio realizado en suelos arcillosos debido a su elevada presencia en la zona Oriental del país y también a que son de los suelos que presentan mayores dificultades a la hora de trabajar sobre ellos y al mismo tiempo debido a sus propiedades físico-químicas los hacen de los suelos más beneficiosos al hombre, debido a que pueden ser utilizados en muchas ramas como la ingeniería, la agricultura y la industria. Es por esto que las arcillas se describen desde su origen, además se menciona la composición mineralógica de las principales tipos de arcillas y las propiedades físico-químicas más sobresalientes, hablando también de la consistencia de los suelos y de las metodologías realizadas para el análisis para la clasificación de las muestras.

También se hace una descripción de los sitios en estudio y de la metodología utilizada en los sitios para la extracción de las muestras, dependiendo del tipo de prueba a realizar. En el documento se describen los procedimientos que se realizaron para efectuar los ensayos de laboratorio, desde la descripción del equipo utilizado y el procedimiento para ejecutar cada uno de los ensayos hasta la forma correcta en que deben presentarse los resultados obtenidos.

Al final, una vez se realizaron todas las pruebas se hizo una comparación con los resultados arrojados por cada prueba para poder correlacionar los valores de plasticidad con los diferentes minerales presentes en cada muestra.

CAPÍTULO I: ANTEPROYECTO

1.1 INTRODUCCION

Actualmente, en El Salvador existe un notable crecimiento en la industria de la construcción cada vez más acelerada, especialmente en la zona oriental del país, que hace necesario que al realizar las cimentaciones en toda obra civil se estudien ciertas características del suelo del lugar donde se realiza el proyecto ingenieril, tales como: origen, distribución granulométrica, capacidad para drenar agua, compresibilidad, resistencia al corte, composición mineralógica y otras más.

Dicha investigación del suelo es importante, ya que ésta exploración tendrá un propósito, el cual pretende darnos a conocer, mediante los métodos apropiados de análisis en laboratorio, las capacidades de carga del suelo, asentamientos, recomendación para el tipo más apropiado de cimentación y estabilización, entre otros.

Es por ello que el presente documento se estudió algunos bancos ubicados en la zona oriental del país, para identificar y clasificar las arcillas encontradas, que sirva como referencia para que los posibles usuarios tengan un conocimiento previo de dichos suelos.

1.2 ANTECEDENTES.

La necesidad de utilización de los recursos naturales existentes en El Salvador, para fines constructivos, es cada vez mayor. Con más razón en la actualidad, debido a la firma de tratados de libre comercio entre el Gobierno de El Salvador con otras naciones industrializadas, y con los países centroamericanos, ha generado en el Órgano Ejecutivo la obligación de crear planes de desarrollo social en aquellas poblaciones, que por su ubicación geográficas y su lejanía respecto a polos de desarrollo, hayan quedado al margen de programas de desarrollo social ejecutados en años anteriores en otras zonas del país (con el fin de prepararse con infraestructura necesaria para poder someterse a las exigencias de este tipo de acuerdos económicos como por ejemplo en la construcción de carreteras, puertos marítimos, fábricas, viviendas, edificios, etc.).

Debido a lo anterior, el Ejecutivo esta desarrollando dentro del plan de desarrollo enfocado para la zona oriental del país, el proyecto de Reconstrucción del Puerto Cutuco, en el departamento de La Unión, el cual es el proyecto más importante a ejecutarse en esa zona y es el motivo primordial por el cual se han realizado otros proyectos previos, como la construcción de la Autopista que inicia en la carretera panamericana, desde la ciudad de San Miguel, y se conecta directamente con el puerto sin ingresar a la ciudad de La Unión, con el fin de facilitar el acceso a toda la zona industrial que se espera

desarrollar en esa región (ésta entre otras actividades), con el propósito de equipar a la zona oriental con infraestructura necesaria para poder facilitar el movimiento de mercancías a través del puerto a otras partes del país y a los países vecinos, así como de impulsar el desarrollo de la zona oriental, generando empleo por medio de la construcción y operación de todas estas obras para beneficio del país. Todo esto, crea la necesidad de utilizar los recursos existentes de la zona, y uno de ellos es el recurso suelo, donde se proyectarán una serie de infraestructuras que deberán tener cimentaciones firmes para garantizar la vida útil de diseño. Esto solo se hace posible si se conocen de forma precisa los parámetros geotécnicos de los suelos, por lo que se hace necesario realizar diferentes estudios.

Entre las investigaciones que se tienen de referencia en el país, podemos mencionar el mapa geológico elaborado por un equipo de investigadores provenientes de Alemania, realizado entre la década de los 60's y 70's, los cuales determinaron los orígenes geológicos de la mayoría de rocas que dieron paso a los suelos que se encuentran en el país, el cual será de gran ayuda a la hora de ubicar los bancos donde se extraerán las muestras de arcilla a estudiar. Más recientemente se tiene el "Estudio experimental de las arcillas negras de Pasaquina para su utilización como material de construcción", en el departamento de La Unión, dicho estudio se ejecutó en el año de 1,992 realizado como trabajo de graduación por estudiantes de la Universidad de El Salvador, el cual servirá como un documento de referencia.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Sobre los tipos de suelos del país, solo se tiene información acerca del origen geológico, usos de suelo (como planificación urbanística), tipo de vegetación natural de cada región, usos agrícolas, entre otros de forma general, pero no se cuenta con información detallada sobre la composición mineralógica de suelos, en nuestro caso de tipo arcillosos, que den a conocer de manera más clara y eficiente las características que éstos presentan y que a la postre conlleven a otro estudio que permita conocer posibles alternativas de tratamiento que se debe de dar a los tipos de suelo arcillosos identificados en cada lugar, que resulten económicas y que garanticen la seguridad y estabilidad a estructuras que se pretende proteger de efectos indeseables del suelo de cimentación.

El problema consiste en identificar y caracterizar de forma precisa los tipos predominantes de arcilla que se encuentran en cada uno de los bancos, los cuales se encuentran ubicados en el Municipio de Güatajagüa (Morazán) y Facultad Multidisciplinaria de Oriente en el Municipio de San Miguel (San Miguel), donde se desarrollará la investigación, ésta se realizará utilizando la técnica de difracción de rayos "X" (DRX) para definir la composición mineralógica de los afloramientos y así caracterizar el ensamble de minerales presentes, así mismo se determinará la consistencia que presenta cada muestra estudiada, determinando los siguientes parámetros: Limite Líquido,

Limite Plástico, Limite de Contracción e Índice de Plasticidad, esto permitirá correlacionar la mineralogía con las propiedades físicas.

A partir de los parámetros obtenidos y con la ayuda de la Carta de Plasticidad poder tener así una clasificación preliminar de los suelos de tipo arcilloso y hacer una descripción cualitativa de las características observadas en las arcillas de cada uno de los bancos en su estado natural, ésto junto a la composición mineralógica, nos permitirá clasificar las arcillas, desde el punto de vista geotécnico, que se encuentran en los bancos.

1.4 OBJETIVOS

GENERAL.

Identificar los tipos de arcillas con sus minerales predominantes en los bancos ubicados en el Municipio Güatajiagüa (Morazán) y Facultad Multidisciplinaria de Oriente en el Municipio de San Miguel (San Miguel).

ESPECIFICOS.

- Identificar de forma teórica las Propiedades Físico-Químicas de las arcillas, obtenidas mediante diferentes pruebas de laboratorio.
- Documentar la metodología de muestreo, aplicación y análisis de las pruebas de difracción de Rayos “X” y Límites de Consistencia.
- Correlacionar los resultados obtenidos del análisis por difracción de Rayos “X”, con los obtenidos en los ensayos de los Límites de Consistencia o Límites de Atterberg.
- Determinar la composición mineralógica de las arcillas encontradas en cada uno los bancos en estudio, por medio del análisis de difracción de Rayos “X”, comparando los resultados obtenidos de las muestras secadas al aire con las muestras sometidas a glicolación.
- Determinar la plasticidad de las muestra de arcilla tomadas en cada uno los bancos en estudio por medio del análisis de los resultados de los Límites de Consistencia.

- Elaborar una base de datos que conduzca a la investigación y clasificación de las arcillas en el país, para ser utilizadas con propósitos ingenieriles.

1.5 ALCANCES.

La investigación sobre los tipos de suelo arcilloso estará enfocada en dos de los cuatro departamentos de la zona oriental del país: San Miguel y Morazán, pero esto no quiere decir que se estudiaran todas las arcillas contenidas en dichos departamentos, ya que esto sería demasiado extenso con respecto al tiempo y no es factible desde el punto de vista económico. Entonces lo que se pretende realizar con esta investigación, es proporcionar el estudio de un banco de cada departamento con lo cual sirva de referencia al analizar otras arcillas con características similares, sobre las que se pretende realizar una obra civil. Al final se proporcionará el tipo de arcilla, definiendo su mineralogía y plasticidad, que existe en los bancos mencionados para que el lector ocupe estos parámetros dependiendo de sus necesidades.

1.6 LIMITACIONES.

Al realizar el estudio de las arcillas en la zona oriental del país, nos encontraremos con diversos inconvenientes, los cuales limitan el alcance de éste, de los cuales podemos mencionar:

El tiempo: lo ideal sería realizar un estudio de todas las arcillas existentes en el país, pero esto llevaría mucho tiempo ejecutarlo por lo que solamente se ha tomado un banco por departamento, esperando se siga este estudio con otros bancos para tener información mas exacta de cada departamento.

Económicas: también es de mencionar que el estudio será financiado por los investigadores, por lo que no puede ser muy extenso, siendo factible estudiar los bancos elegidos.

Equipo: nos limitaremos al uso del equipo cuando exista disponibilidad de parte del CIAN (centro de investigación y análisis nuclear de la universidad de El Salvador) para la prueba de difracción de Rayos "X" y por parte del laboratorio externo para los límites de consistencia.

1.7 JUSTIFICACION.

Debido a que anteriormente no se tenían polos de desarrollo, la importancia en la utilización de los suelos presentes en la zona oriental para fines urbanísticos y comerciales era mínima. Tomando en cuenta el crecimiento poblacional en esta región del país, se observa la necesidad de utilizar los tipos de suelos disponible, particularmente de tipo arcilloso de una forma acelerada, por lo cual es de gran valor el conocimiento de sus características, que servirán para proponer a futuro metodologías de estabilización a cada uno de ellos, para cimentar todo tipo de estructuras y garantizar que dicho suelo se comportará de una manera estructuralmente adecuada; lo que se conseguirá aplicando la técnica que propongan los especialistas en geotecnia en función del tipo de arcilla que se tenga presente en esa zona.

Por lo anterior se cree que es importante realizar este estudio a los suelos presentes en dicha zona, principalmente a los de tipo arcilloso, ya que en su mayoría está constituida por este suelo.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 ORIGEN DE LAS ARCILLAS.

Para poder hablar del origen de minerales tan complejos como las arcillas que forman parte de los suelos, es importante tener claro ciertas nociones de la formación de estos en general; para ello daremos una breve introducción de la formación del suelo, y así después hablar un poco de la formación de los suelos arcillosos.

Suelo, como concepto de Ingeniería civil, es el agregado no cementado de minerales y materia orgánica descompuesta conocidas como partículas sólidas, acompañadas por líquido y gas.

La corteza terrestre no es una masa estática, al contrario, es muy dinámica, por lo que se encuentra en un cambio constante. En la actualidad para entender y explicar los fenómenos naturales que ocurren en la superficie terrestre se acepta la teoría de “La Tectónica de placas” ó también llamada “Tectónica global”; definiendo a la corteza terrestre por unas veinte placas semirrígidas todas éstas flotando sobre el manto, según muestra la figura 2.1.1. Esta dinámica de la tierra es la principal responsable de los cambios en la superficie terrestre ya que trae como consecuencia fenómenos sísmicos, tectónicos y volcánicos, los

cuales se combinan con los agentes de meteorización y erosivos modificando el paisaje; y como parte de todos estos cambios se originan los suelos.

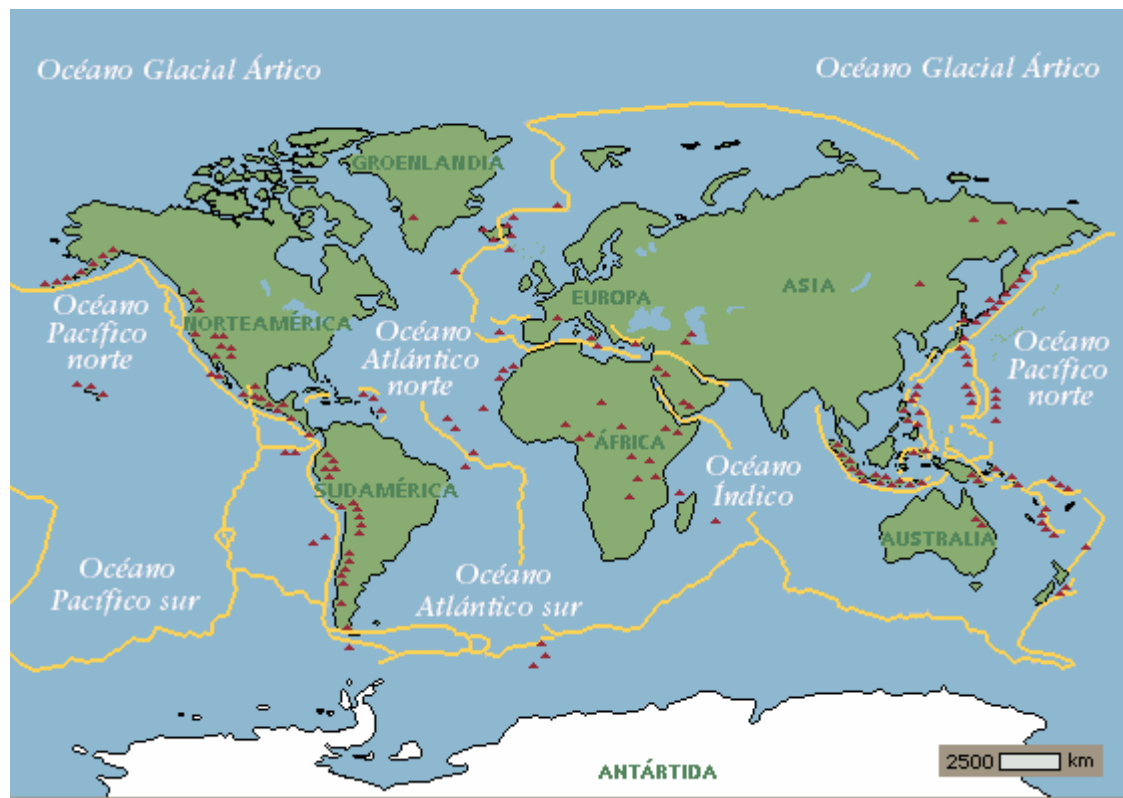


Figura 2.1.1: Fronteras de las placas tectónicas definidas por los científicos en base de la actividad volcánica en la superficie terrestre.

Uno de los procesos más importantes en la creación de los suelos, es la Erosión, y es la principal encargada del movimiento de las partículas de suelo en la superficie terrestre.

Se establece así el equilibrio en la corteza terrestre; por un lado las fuerzas tectónicas creando relieve y por el otro las fuerzas erosivas desbastándolo.

La Meteorización y la erosión atacan las rocas, dando una formación primeramente de un suelo denominado “Suelo Residual”, y si el suelo es depositado en otro lugar que no sea el de su origen, recibe el nombre de “Suelo Transportado”.

Dicho esto podemos afirmar que todos los suelos proceden de las rocas de la corteza terrestre a través de un proceso de erosión, salvo raras excepciones.

La erosión se puede presentar de diferentes maneras, las cuales se encuentran integradas en dos grupos:

1. Erosión Física
2. Erosión Química

EROSIÓN FÍSICA.

En la erosión física encontramos numerosos agentes, mencionando algunos de ellos a continuación:

1. Cambios en la temperatura: cuando las rocas son sometidas a cambios de temperatura pueden desintegrarse, debido a expansiones y contracciones diferenciales.

2. Acción de deshielo: Toda roca posee porosidad (se conoce como porosidad a los orificios que poseen las rocas) conteniendo agua en dichos poros, la cual al encontrarse a bajas temperaturas se congela, lo que produce un aumento de volumen, dando como resultado el pulverizamiento de la roca por la presión ejercida por el hielo así formado; pero para que esto ocurra es necesario que la saturación de la roca se encuentre en un “grado de saturación crítico”, el cual es característico de cada roca.

3. La actividad orgánica: En ocasiones las raíces de los árboles abriéndose paso en el suelo pueden generar fractura en las rocas y/o desplazar bloques de rocas.

4. La fuerza de la gravedad: Las rocas pueden ser fracturadas por tracción, producida por la fuerza de gravedad.

5. Todas estas partículas que se generan por la desintegración de las rocas, por cualquier agente antes mencionado, formarán el agregado no cementado denominado suelo.

EROSIÓN QUÍMICA.

Este tipo de erosión existe en presencia del agua (el disolvente universal). Las principales reacciones son las siguientes:

1. Hidratación: ésta reacción es el cambio de un compuesto químico formando otro compuesto químico debido a la adición de agua.
2. Hidrólisis: se define así a la descomposición química de una sustancia por medio del agua. Las rocas ígneas y sedimentarias poseen silicatos, que a partir de materiales muy distintos y por medio de reacciones de hidrólisis, llegan a un producto final denominado Arcilla.

En resumen el suelo es producido por intemperismo, como se dijo antes, por la fractura y rompimiento de las rocas en piezas más pequeñas por medios físicos y químicos. Los suelos que permanecen donde se originan se denominan suelos residuales; si dichos suelos son transportados por agentes físicos se denominan Suelos Transportados. Según el agente de transporte podemos mencionar tres tipos de suelos:

1. Aluviales ó Fluviales: suelos transportados por el agua
2. Glaciales: como su nombre lo indica son suelos transportados por acción glacial
3. Eólicos: suelos transportados por acción del viento

Cabe mencionar que dependiendo del tamaño de las partículas la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y del transporte (AASHTO) definió la prueba normada ASTM D-3282 método AASHTO M145 para clasificar el suelo, siendo su clasificación más general la siguiente:

1. Gravas: partículas de suelo con tamaño superior a los 2 mm
2. Arenas: partículas de suelo con tamaño desde los 2 mm hasta 0.075 mm
3. Limos: partículas de suelo con tamaño desde los 0.075 mm hasta 0.002 mm
4. Arcillas: partículas de suelo con tamaños inferiores a 0.002 mm

2.2 COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LOS SUELOS ARCILLOSOS (MINERALOGÍA DE LAS ARCILLAS)

HISTORIA DE LA MINERALOGÍA DE LAS ARCILLAS

Con el descubrimiento de los Rayos X por el doctor Wilhelm Conrad Roentgen, y posteriormente el descubrimiento de la difracción de los Rayos X por Max Theodor Felix Von Laue, se obtuvieron nuevas formas para realizar estudios a los minerales arcillosos. Durante los años 20 y a principios de los 30 se realizaron una serie de importantes documentos acerca de los minerales arcillosos, pero sin que en ellos se hiciera una gran distinción entre los materiales de granos finos, lo cual dejaba muchas interrogantes. Esto motivó a realizar estudios posteriores para lograr entender mejor estos materiales, entre los cuales se puede destacar el trabajo realizado por Hadding y Rinner, en Europa, el cual fue considerado como el primero en el que se utilizó la difracción de rayos X para estudiar el tamaño de los minerales arcillosos.

J. W. Grunner siguiendo las ideas de Pauling descubrió la estructura de la caolinita. Hoffmann (1933) sugirió un modelo para la montmorillonita, la cual estaba caracterizada por poseer una estructura expansiva.

En 1953, Ralph Early Grim publicó su libro “La Mineralogía de las Arcillas”, seguido, en 1962, por su libro “Aplicación de la Mineralogía de las Arcillas”.

Estos libros, especialmente el primero, fueron considerados como un gran aporte para que la disciplina de la mineralogía de las arcillas se desarrollara en Norte América.

En los años posteriores trabajadores de diferentes disciplinas, tales como: agronomía, cerámica, química, ingeniería, geología, mineralogía y física, realizaron intensas investigaciones, mediante las cuales empezaron a descubrir muchas de las bondades que poseen las arcillas, aplicándolas a sus intereses.

ESTRUCTURA DE LAS ARCILLAS

Los minerales arcillosos son unos de los minerales más abundantes en la superficie terrestre. Son los principales componentes de la mayoría de los suelos, así como de las rocas sedimentarias. Como se explicó anteriormente son el producto más común que se obtiene debido a la meteorización química de los minerales formados en las profundidades de la tierra. Es de suma importancia el conocer muy bien este tipo de minerales y sus propiedades, debido a que el medio ambiente en el cual estos minerales son formados es además el lugar en donde habitan muchos seres humanos y otras formas de vida.

Las arcillas son minerales con un tamaño de partícula extremadamente pequeña, esto es, menor de 2 μm (0.002 mm), y alguna de ellas poseen la propiedad de adquirir plasticidad al mezclarse con agua.

Duane M. Moore y Robert C. Reynolds descubrieron que al examinar las curvas de distribución del tamaño de las partículas del cuarzo y el feldespato en sedimentos, su abundancia empezaba a disminuir sutilmente cerca de los 10 a 20 μm , y se vuelve más baja al aproximarse al tamaño de 4 μm ; esto, según ellos, se debe a que los procesos físicos que pulverizan o desmenuzan el cuarzo en aguas turbulentas se vuelve inefectivo en tamaños de granos tan pequeños. Es decir, si encontramos partículas menores a las 4 μm , éstas fueron formadas por erosión química, por medio de procesos de hidrólisis, y no por erosión física, es por ello que la mayoría de los minerales que tienen un tamaño menor de 0.002 mm son considerados minerales arcillosos.

La composición de las arcillas es, por otra parte, muy variable. Por esta causa, se defendió durante mucho tiempo la teoría de que la arcilla era una mezcla de geles amorfos de sílice y sesquióxidos, sin proporciones fijas. La teoría opuesta mantenía que la arcilla se componía de una mezcla de partículas pertenecientes cada una, individualmente, a una especie química perfectamente definida.

En la actualidad, la investigación de la arcilla por medio de los Rayos "X" ha demostrado que las partículas de arcilla son cristales de especies mineralógicas bien identificadas. La variabilidad de la composición de las arcillas proviene, en primer lugar, de la mezcla de estas especies y, en segundo lugar, de los fenómenos de absorción que se desarrollan en las partículas. Pero, además, se

ha demostrado también que la teoría opuesta era, hasta cierto punto, verdadera, pues no cabe hoy duda de la coexistencia en la arcilla, al lado de las especies cristalinas, de geles amorfos (alofana) que contribuyen también a la infinita variedad de esta fracción granulométrica del suelo. Estos geles, sin embargo, se presentan en pequeña cantidad y corresponden a una forma transitoria, ya que en general evolucionan hacia el estado cristalino. En los casos en que la erosión química, por condiciones especiales, produce un exceso de geles de sílice o de sesquióxidos, queda un resto que no se puede combinar para producir minerales cristalinos y permanece en el suelo.

Desde el punto de vista químico, los minerales arcillosos son complejos silicatos de aluminio, hierro, magnesio, etc., compuestos de una o dos unidades estructurales básicas:

- 1) Tetraedro de sílice y
- 2) Octaedro de alúmina.

Cada tetraedro consiste en cuatro átomos de oxígeno que rodean a un átomo de silicio, el cual puede ser sustituido por aluminio y muy frecuentemente por hierro, (figura 2.2.1).

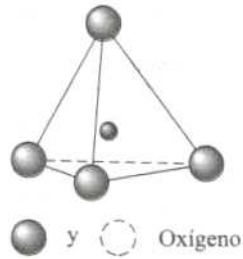


Figura 2.2.1: Tetraedro formado por cuatro átomos de oxígeno y uno de silicio

La combinación de unidades de tetraedros de sílice da una lámina de sílice (figura 2.2.2).

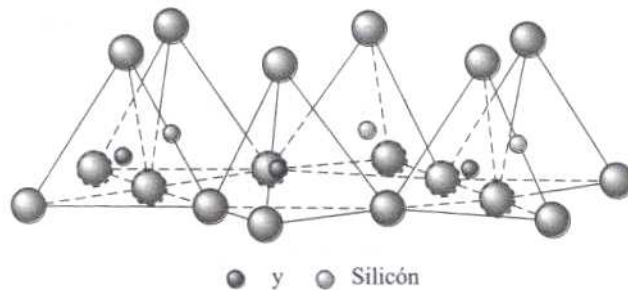


Figura 2.2.2: Lámina de sílice formada por la combinación de tetraedros de sílice

Si nos imagináramos una lámina llena de estos tetraedros, extendida infinitamente en dos dimensiones, cada tetraedro descansa en una de sus caras triangulares y comparte los átomos de oxígeno en las tres esquinas con otros tres tetraedros, distribuidos de tal manera que forman hexágonos, como muestra la figura 2.2.3:

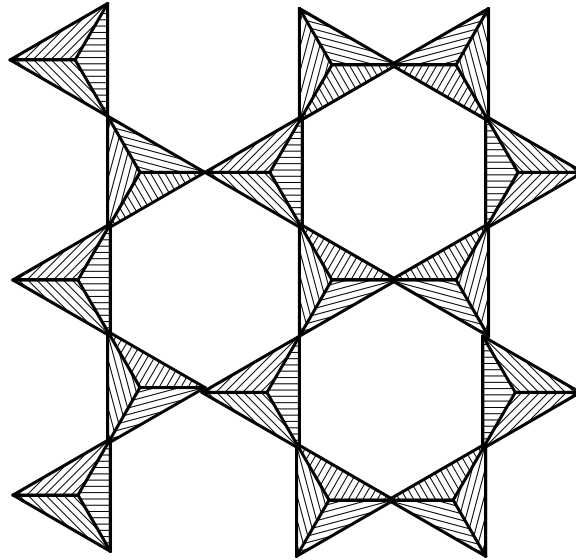


Figura 2.2.3: Vista en planta de una lámina de sílice

Las unidades octaédricas consisten en seis átomos de oxígeno o iones hidroxilos que rodean un átomo de aluminio, hierro, magnesio, etc (figura 2.2.4),

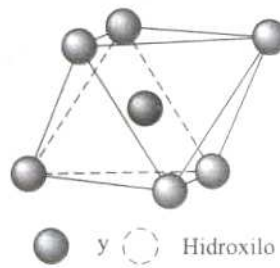


Figura 2.2.4: Octaedro formado por seis átomos de oxígeno y uno de aluminio

y la combinación de las unidades octaédricas de hidroxilos de aluminio dan una lámina octaédrica, también llamada lámina de gibbsita (figura 2.2.5).

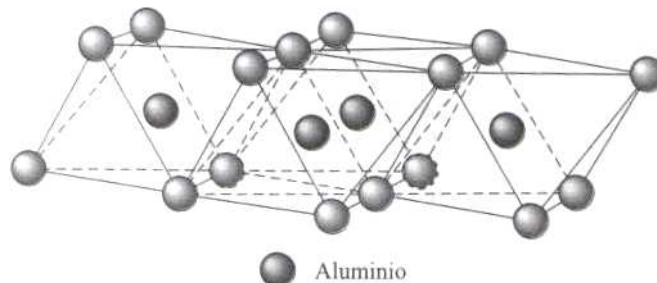


Figura 2.2.5: Lámina de gibbsita formada por la combinación de octaedros de aluminio

En ocasiones el magnesio reemplaza los átomos de aluminio en las unidades octaédricas; en tal caso, la lámina octaédrica se llama lámina de brucita.

Cuando las láminas octaédricas se unen a otras tetraédricas; el plano de unión entre ambas capas está formado por los oxígenos de los tetraedros que se encontraban sin compartir con otros tetraedros, y por grupos (OH)⁻ de la capa brucítica o gibbsítica, de forma que, en este plano, quede un (OH)⁻ en el centro de cada hexágono formado por 6 oxígenos apicales. El resto de los (OH)⁻ son reemplazados por los oxígenos de los tetraedros; este tipo de uniones se denominan bilaminares, 1:1 ó T:O (figura 2.2.6).

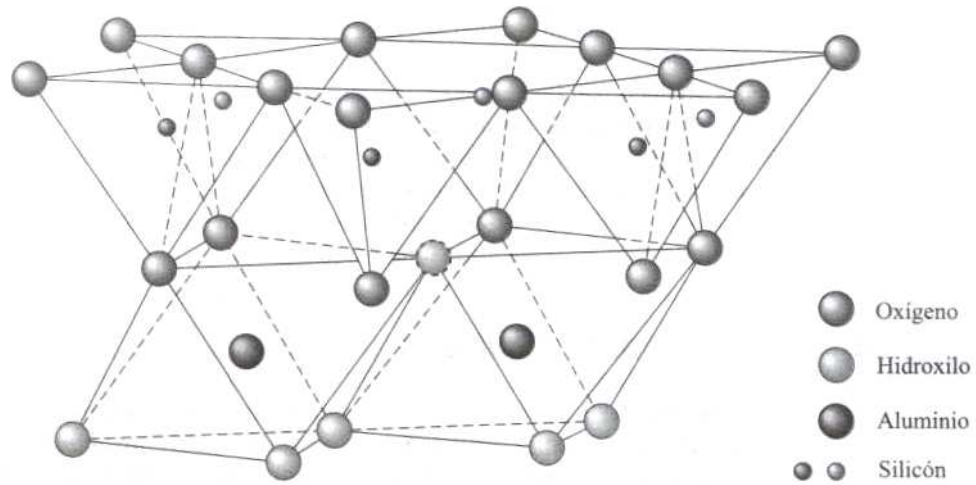


Figura 2.2.6: Unión de una lámina tetraédrica con una octaédrica, formando una unión bilaminar

Una unión similar puede ocurrir por medio de tres capas: una octaédrica y dos tetraédricas, denominándose trilaminares, 2:1 o T:O:T (figura 2.2.7).

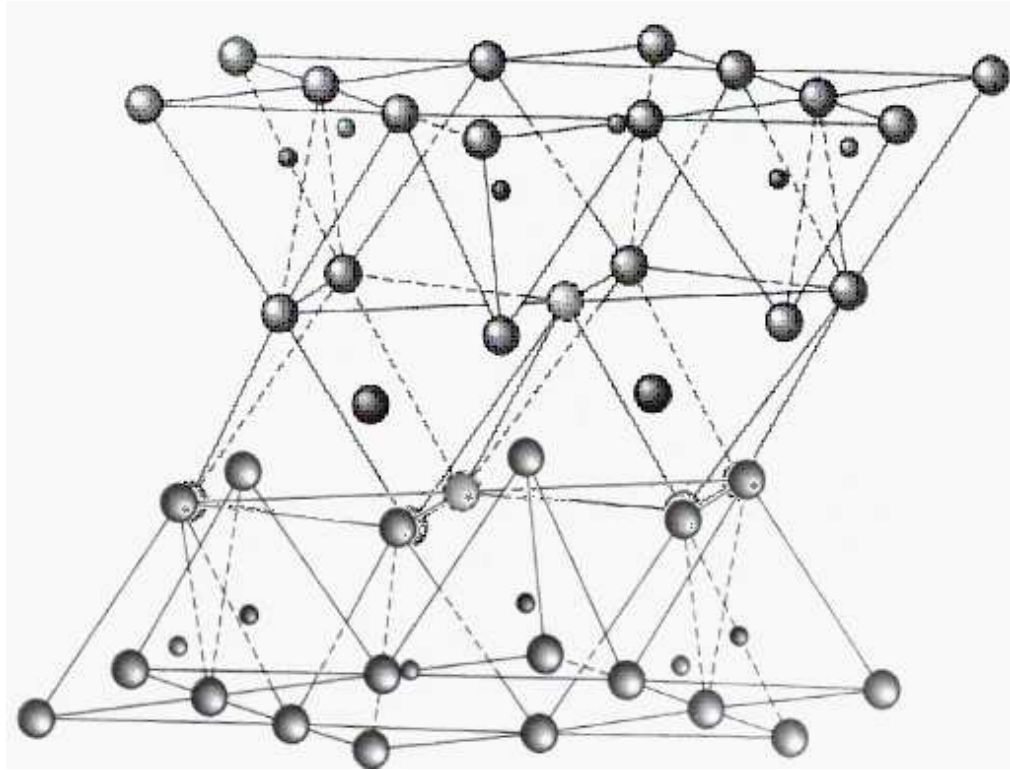


Figura 2.2.7: Unión de dos láminas tetraédricas con una octaédrica, formando una unión trilaminar

Lo anterior nos da una base para entender la estructura de una arcilla, a continuación describimos ejemplos de arcillas conocidas en la actualidad:

La caolinita consiste en capas repetidas de láminas elementales de sílice-gibbsita, como muestra la figura 2.2.8. Cada capa es aproximadamente de 7.2 Å de espesor y se mantienen unidas entre sí por enlaces hidrogénicos. La caolinita ocurre como placas, cada una con una dimensión lateral de 1,000 Å a 20,000 Å y un espesor de 100 Å a 1,000 Å. El área superficial de las partículas

de caolinita por masa unitaria es aproximadamente de $15 \text{ m}^2/\text{g}$. El área superficial por masa unitaria se define como superficie específica.

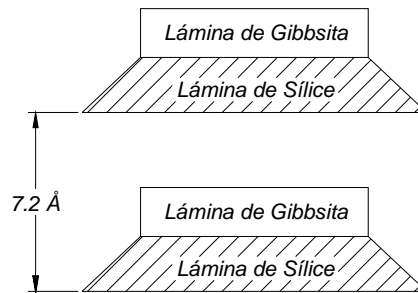


Figura 2.2.8: Estructura de la Caolinita

La Halloysita, estructuralmente es semejante a la caolinita. Una diferencia es que una capa de moléculas de agua puede interponerse entre cada dos unidades fundamentales. La presencia de esta capa de moléculas de agua supone un enlace débil entre las sucesivas unidades, y debido a ello las distancias en una de las caras de la unidad fundamental se acortan, y en la otra se mantienen iguales a las de la caolinita.

El resultado es que la hoja plana de caolinita se transforma en una hoja enrollada (figura. 2.2.9)

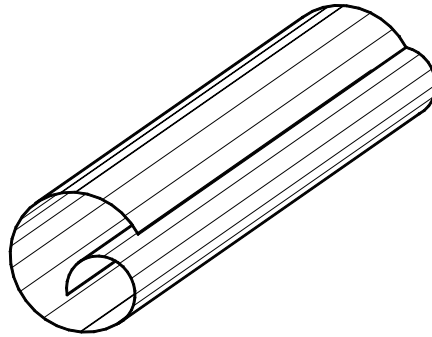


Figura 2.2.9: Hoja enrollada de halloysita.

La halloysita pierde parte de esta agua a temperaturas de 60 a 75° C, y aún menores si se mantienen largo tiempo expuestas a ellas. La pérdida de agua supone, al mismo tiempo, un cambio de propiedades, dándose lugar al mineral metahalloysita. Se observa que, al deshidratarse la partícula, los tubos se rompen, rajan o desenrollan con frecuencia.

La Illita consiste en una lámina de gibbsita enlazada a dos láminas de sílice, una arriba y otra abajo (figura 2.2.10), y es denominada a veces mica arcillosa. Las Illitas son micas de segunda formación, por lo cual reciben también el nombre de “micas hídricas”. En gran parte, se supone que proceden incluso de un proceso diagenético de illitización de la montmorillonita. Conforme a él, los sedimentos montmorilloníticos antiguos van fijando el potasio entre sus láminas. Esta circunstancia sería la causa de la deficiencia de potasio en los océanos, ya que la razón entre el contenido de este metal y el contenido de sodio, en el agua de mar, es varias veces inferior a la razón que existe en las rocas de la

corteza terrestre. Esta influencia de carácter global como fijadora del potasio puede ser ejercida por la illita por ser ésta la especie mineralógica de arcilla más abundante. Las capas de illita están enlazadas entre sí por iones de potasio. La carga negativa para balancear los iones de potasio proviene de la sustitución de aluminio por silicio en las láminas tetraédricas. La sustitución de un elemento por otro, sin cambio en la forma cristalina, se conoce como sustitución isomorfa. La estructura de la Illita no es expansiva; no admite la entrada de átomos de agua entre las capas. Las partículas de illita tienen generalmente dimensiones que varían entre 1,000 Å y 5,000 Å y espesores de 50 Å a 500 Å. La superficie específica de las partículas es aproximadamente de 80 M²/g.

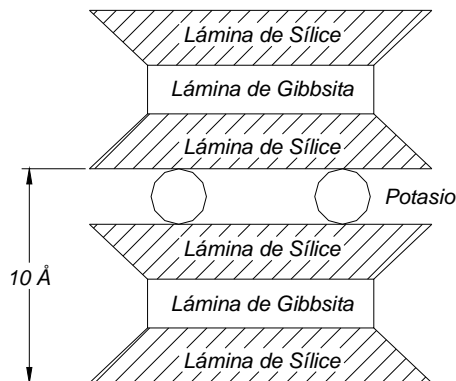


Figura 2.2.10: Estructura de la Illita

La montmorillonita (esmeectitas) tiene una estructura similar a la illita, es decir, una lámina de gibbsita intercalada entre dos láminas de sílice (figura 2.2.11). En

la montmorillonita hay sustitución isomorfa de magnesio y hierro por aluminio en las láminas octaédricas. Los iones de potasio no están aquí presentes como en el caso de la illita y una gran cantidad de agua es atraída hacia los espacios entre las capas ocasionando una expansión de la partícula en el sentido perpendicular a la capa. Esta expansión puede ser muy grande. Las partículas de montmorillonita tienen dimensiones laterales de 1,000 Å a 5,000 Å y espesores de 10 Å a 50 Å. La superficie específica es aproximadamente de 800 m²/g.

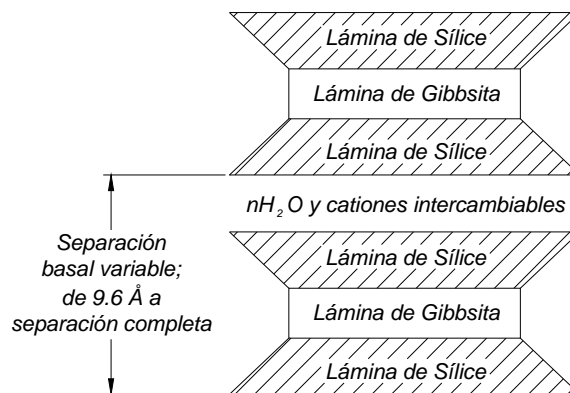


Figura 2.2.11: Estructura de la montmorillonita

Las partículas de arcilla llevan una carga neta negativa sobre la superficie, resultado de una sustitución isomorfa y de una ruptura en la continuidad de la estructura en sus bordes. Cargas negativas mayores se derivan de superficies específicas mayores. Algunos lugares cargados positivamente ocurren también en los bordes de las partículas.

En arcilla seca, la carga negativa es balanceada por cationes intercambiables, como Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ y K^+ , que rodean a las partículas mantenidas juntas por atracción electrostática. Cuando se agrega agua a la arcilla, esos cationes y un pequeño número de aniones flotan alrededor de las partículas de arcilla. A esto se le llama capa difusa doble (figura 2.2.12).

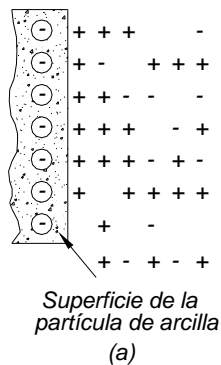


Figura 2.2.12: Capa difusa doble en la superficie de una arcilla

La concentración de cationes decrece con la distancia desde la superficie de la partícula (figura 2.2.13).

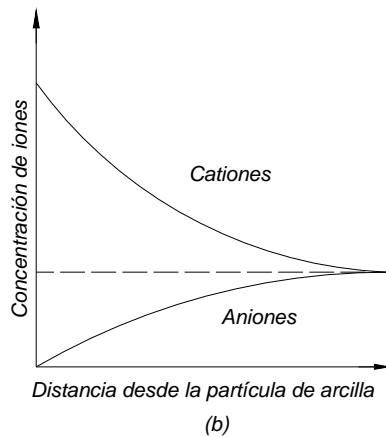


Figura 2.2.13: Decrecimiento de cationes a medida nos alejamos de la superficie de la arcilla

Las moléculas de agua son polares. Los átomos de hidrógeno no están dispuestos de manera simétrica alrededor de un átomo de oxígeno; más bien, forman un ángulo de enlace de 105° . En consecuencia, una molécula de agua actúa como una pequeña barra con carga positiva en un extremo y una carga negativa en el otro, y esto se conoce como dipolo.

El agua dipolar es atraída por la superficie cargada negativamente de las partículas de arcilla y por los cationes en la capa doble. Los cationes a su vez son atraídos a las partículas de suelo. Un tercer mecanismo por el cual el agua es atraída a las partículas de arcilla es el enlace hidrogénico, en el que los átomos de hidrógeno en las moléculas de agua son compartidos con átomos de oxígeno sobre la superficie de la arcilla. Algunos cationes parcialmente hidratados en el agua de poros son también atraídos a la superficie de las partículas de arcilla. Estos cationes atraen a las moléculas de agua dipolar. La

fuerza de atracción entre el agua y la arcilla decrece con la distancia desde la superficie de las partículas. Toda el agua mantenida unida a las partículas de arcilla por fuerza de atracción se conoce como agua de capa doble. La capa interior del agua de capa doble, que se mantiene unida muy fuertemente por la arcilla, se conoce como agua adsorbida y es más viscosa que el agua libre. La orientación del agua alrededor de las partículas de arcilla da a los suelos arcillosos sus propiedades plásticas.

PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS MINERALES ARCILLOSOS

Las importantes aplicaciones de este grupo de minerales radican en sus propiedades físico-químicas. Dichas propiedades derivan, principalmente, de:

- Su extremadamente pequeño tamaño de partícula (inferior a 2 mm)
- Su morfología laminar (filosilicatos)
- Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Como consecuencia de estos factores, presentan, por una parte, un valor elevado del área superficial y, a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie específica o activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interaccionar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada

proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hinchar, con el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas.

Por otra parte, la existencia de carga en las láminas se compensa con la entrada en el espacio interlaminar de cationes débilmente ligados y con estado variable de hidratación, que pueden ser intercambiados fácilmente mediante la puesta en contacto de la arcilla con una solución saturada en otros cationes, a esta propiedad se la conoce como capacidad de intercambio catiónico y es también la base de multitud de aplicaciones.

Entre las principales propiedades físico-químicas que presentan los minerales arcillosos podemos mencionar las siguientes:

· Superficie específica

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que esta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en metros cuadrados por gramos (m^2/g).

Las arcillas poseen una elevada superficie específica, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad.

A continuación se muestran algunos ejemplos de superficies específicas de arcillas:

- Caolinita de elevada cristalinidad hasta $15 m^2/g$

- Caolinita de baja cristalinidad hasta 50 m²/g
- Halloisita hasta 60 m²/g
- Illita hasta 80 m²/g
- Montmorillonita 80-300 m²/g
- Sepiolita 100-240 m²/g
- Paligorskita 100-200 m²/g

Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Esta es una de las principales propiedades de las arcillas. Esta propiedad consiste en la capacidad de algunas arcillas de cambiar, fácilmente, los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de sus estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. La CIC esta expresada en términos de miligramos equivalentes por 100 gramos de suelo (mg/100g). Esta también expresada en centimoles por kilogramo de suelo (CMOL/Kg). Ambas unidades de medidas son iguales. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH, y es equivalente a la medida del total de las cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

- Sustituciones isomórficas dentro de la estructura.

- Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- Disociación de los grupos hidroxilos accesibles.

El primer tipo es conocido como carga permanente y supone un 80 % de la carga neta de la partícula; además es independiente de las condiciones de pH y actividad iónica del medio. Los dos últimos tipos de origen varían en función del pH y de la actividad iónica, y las cargas que generan son conocidas como cargas dependientes. Corresponden a bordes cristalinos, químicamente activos y representan el 20 % de la carga total de la lámina.

Las cargas permanentes, constantes o estructurales se han generado, a través de los procesos geológicos, debido a sustituciones isomórficas en las estructuras cristalinas, generalmente negativas debido al reemplazo de átomos de la estructura por otros de menor valencia (magnesio por aluminio, aluminio por silicio). Estas cargas resultan independientes del entorno del mineral.

En los bordes, sin embargo, aparecen cargas que son dependientes del pH del medio y por lo tanto son variables. Surgen de la disociación de grupos superficiales.

Sólo se encuentran neutralizadas bajo una cierta condición de pH, denominada pzc : punto de carga cero (point of zero charge), que depende del tipo de enlace químico involucrado. Cuando el pH se eleva por encima del pzc, en un medio más alcalinizado, la superficie de borde adquiere carga negativa ($\text{pH} > \text{pzc}$) mientras que al descender por debajo del pzc, en un medio más ácido, se

vuelve positiva ($\text{pH} < \text{pzc}$). Esto no implica que el valor de pzc sea neutro, dependiendo del grupo funcional implicado puede oscilar entre ácidos y alcalinos.

La capacidad de intercambio varía, para un determinado tipo de arcilla, con el tamaño de la partícula, siendo más elevado en tamaños finos, por ser mayor su superficie específica. Para arcillas diferentes, la capacidad depende de la estructura; así, por ejemplo, en el caso de la montmorillonita, todos los cationes situados dentro de la estructura son intercambiables, mientras que los cationes intercapa de la illita no son tan fácilmente cedidos porque forman parte de la red.

A continuación se muestran algunos ejemplos de capacidad de intercambio catiónico (en mg/100g):

Caolinita	3-5
Halloisita	10-40
Illita	10-50
Clorita	10-50
Sepiolita-palygorskita	20-35
Montmorillonita	80-200
Vermiculita	100-200

· Capacidad de absorción y adsorción

Se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: La absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y la adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (esmeclitas) o en los canales estructurales (sepiolita y palygorskita) ver figura 2.2.14

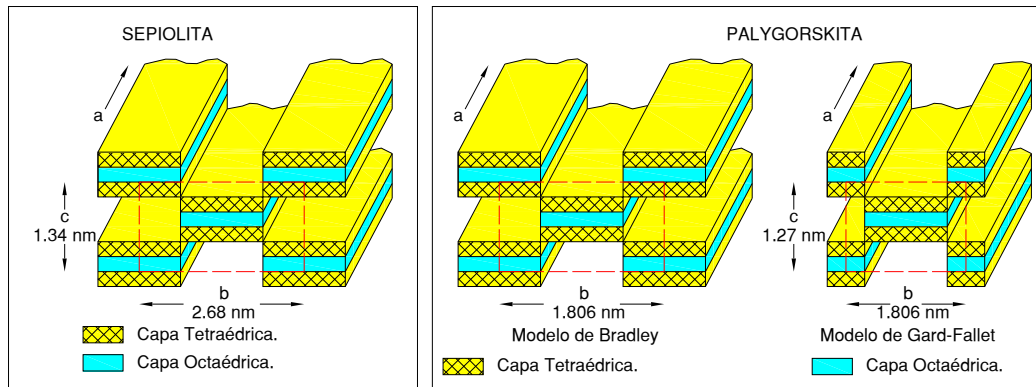


Figura 2.2.14 Estructura fundamental de la sepiolita y palygorskita. Notar los canales tipo túnel.

La absorción es un proceso en el cual las moléculas o átomos de una fase interpenetran casi uniformemente en los de otra fase constituyéndose una

"solución" con esta segunda. Se puede decir que la capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales de las arcillas (superficie específica y porosidad)

Por contra, la adsorción es un proceso mediante el cual se extrae materia de una fase y se concentra sobre la superficie de otra fase (generalmente sólida). Por ello se considera como un fenómeno subsuperficial (ver figura 2.2.15). La sustancia que se concentra en la superficie o se adsorbe se llama "adsorbato" y la fase adsorbente se llama "adsorbente". La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate.

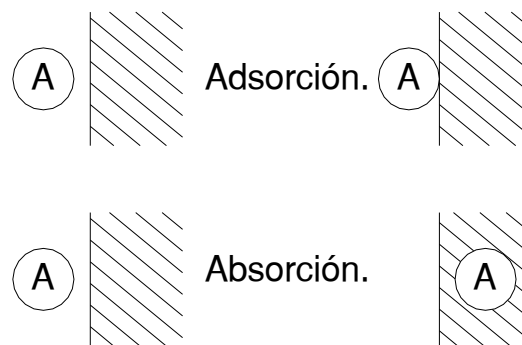


Figura 2.2.15 Representación esquemática de los procesos de adsorción y absorción

. Hidratación e hinchamiento

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de las arcillas, y cuya importancia es crucial en sus diferentes usos. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo

de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina.

La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A continuación en la figura 2.2.16 se describe en forma secuencial el proceso de hidratación de las arcillas y su posterior hinchamiento.

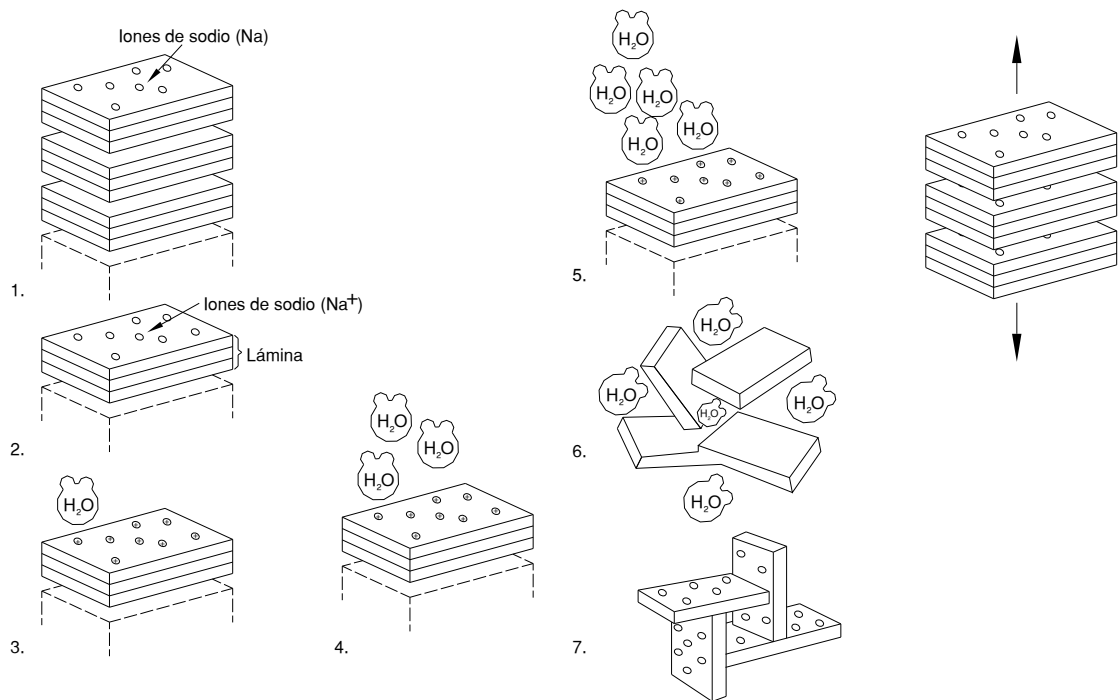


Figura 2.2.16 Etapas secuenciales el proceso de hidratación de las arcillas y su posterior hinchamiento.

Etapa 1: en el principio la arcilla se encuentra en un estado deshidratado, algunos iones de sodio (Na^+), potasio (K^+) o tal vez calcio (Ca^{2+}) son adsorbidos en el espacio interlaminar.

Etapa 2: desde el punto de vista electrostático, las cargas negativas en la arcilla se acumulan en las superficies planas de las laminillas, mientras que los bordes acumulan cargas positivas. Luego los iones de sodio tienden a concentrarse sobre las caras planas.

Etapa 3: al ponerse en contacto con la arcilla, las moléculas de agua son atraídas fuertemente hacia las superficies planas debido a la presencia de los iones sodio cargados positivamente. Hay que recordar que, a la escala molecular, las fuerzas electrostáticas son las más importantes.

Etapa 4: en este estado, las moléculas de agua se hacen más dipolares, atrayendo a otras de su especie.

Etapa 5: la carga negativa en la superficie de las laminillas se incrementa conforme las moléculas de agua se enlazan unas con otras al aumentar su polarización. Llega un momento en que la carga superficial es tal, que las láminas se repelen entre sí separándose unas de otras por lo que el espacio

interlaminar se expande, originando el hinchamiento característico de las arcillas.

Etapa 6: las moléculas de agua continúan llenando el espacio interlaminar, neutralizando parcialmente las superficies expuestas y manteniendo las láminas apartadas unas de otras, hasta que el agua es eliminada mediante algún procedimiento de secado, lo cual origina una contracción del volumen de la lamina.

Etapa 7: el equilibrio de la hidratación es alcanzado cuando termina la mezcla de la arcilla con el agua, dando como resultado una estructura interna hidratada que hace coincidir los bordes cargados positivamente con las caras planas cargadas negativamente, de modo que se forma una estructura de castillo de naipes, por lo que las moléculas de agua entran y salen libremente. Este castillo puede derrumbarse mediante una agitación vigorosa de la suspensión, pero tiende a formarse de nuevo si la agitación termina, esto es, si el medio queda libre de esfuerzos mecánicos. Este último efecto se debe a que las hojas mantienen la fuerte carga electrostática que las atrae.

Cabe mencionar que cuando el catión interlaminar es el sodio, las esmectitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esmectita, teniendo como

resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si por el contrario, tienen Ca o Mg como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida.

. Plasticidad

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una capa sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento.

Generalmente, esta plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los límites de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Contracción). Estos límites marcan una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso.

La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. Existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla, e incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión de cambio. En gran parte, esta variación se debe

a la diferencia en el tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.

. Tixotropía

La tixotropía se define como el fenómeno consistente en la pérdida de resistencia de un coloide, al amasarlo, y su posterior recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas cuando son amasadas se convierten en un verdadero líquido. Si, a continuación, se las deja en reposo recuperan la cohesión, así como el comportamiento sólido. Para que una arcilla tixotrópica muestre este especial comportamiento deberá poseer un contenido en agua próximo a su límite líquido. Por el contrario, en torno a su límite plástico no existe posibilidad de comportamiento tixotrópico.

IMPORTANCIA Y USOS DE LOS MINERALES ARCILLOSOS

Muchas son las ramas que se pueden beneficiar por el conocimiento de las propiedades que poseen los minerales arcillosos, entre estas ramas se pueden mencionar la agricultura, la ingeniería y la industria, como en las que este conocimiento aporta más en sus aplicaciones prácticas. En la agricultura, por ejemplo, para lograr obtener los mejores resultados y entender el comportamiento del suelo, es indispensable saber cuales son las diferentes propiedades de los muchos minerales arcillosos que se encuentran en el suelo

sobre el cual se vaya a trabajar, ya que muchas de estas propiedades determinan de gran manera los resultados que se puedan obtener. Propiedades como la capacidad de absorción de un suelo son tan importantes para la mayoría, si no es que todas, de las especies vegetales, ya que estas obtienen el agua del suelo. El agua se mueve a través del suelo, penetra al interior de las raíces y pasa a toda la planta donde casi la totalidad del agua pasa a la atmósfera por el proceso de transpiración. El estado hídrico de las plantas, dentro de cierto límite, es el resultado del intercambio de agua entre dos fuentes principales, el agua del suelo y de la atmósfera. Si la planta pierde más agua a la atmósfera de la que absorbe, se produce un déficit hídrico.

La capacidad de absorción de un determinado suelo, además depende de otras propiedades de las arcillas, como son la superficie específica y la porosidad.

Algunos tipos de arcillas son utilizadas por los agrícolas para mejorar las propiedades de suelos arenosos o ácidos. Así mismo se utilizan esmectitas sódicas para recubrir ciertos tipos de semillas, de forma que su tamaño aumente, y resulte más fácil su distribución mecánica, a la vez que se mejora la germinación.

Actualmente las arcillas comerciales, aquellas que sirven como materia prima industrial figuran entre los recursos minerales más importantes, tanto por el volumen explotado como por el valor de la producción. Un 90 % de la producción se dedica, preferentemente a la fabricación de materiales de

construcción y agregados. Sólo un 10 % se dedica a otras industrias (fabricación de papel, caucho, pinturas, absorbentes, decolorantes, arenas de moldeo, productos químicos y farmacéuticos, agricultura, como ya se menciono, etc.)

En general al primer tipo (las que se utilizan en construcción) se las denomina arcillas cerámicas, arcillas para la construcción o arcillas comunes, son arcillas compuestas por dos o más minerales de la arcilla, generalmente ilita y esmectita, con importantes cantidades de otros minerales que no son filosilicatos (carbonatos, cuarzo, etc). Se utilizan para la fabricación de materiales de construcción, como tejas, ladrillos, tubos, baldosas, alfarería tradicional, lozas, azulejos, etc. Son así mismo utilizadas como agregados en la manufactura de cementos, como fuente de alúmina y sílice, etc.

Al segundo tipo se las denomina arcillas especiales, son arcillas constituidas fundamentalmente por un sólo tipo de mineral de la arcilla, y sus propiedades dependen esencialmente de las características de ese mineral. Estas, a pesar de ser mucho menos importantes en volumen, suponen más del 70 % del valor de las arcillas comerciales, y son objeto de comercio internacional.

Las arcillas especiales se pueden dividir en caolines y arcillas caoliníferas, y bentonitas, sepiolita y paligorskita.

La industria química consume cantidades importantes de caolín en la fabricación de sulfato, fosfato y cloruro de Aluminio, así como para la

fabricación de ceolitas sintéticas. A partir del caolín calcinado se obtienen catalizadores y fibras de vidrio.

La industria farmacéutica utiliza caolín como elemento inerte en cosméticos y como elemento activo en absorbentes estomacales. La elevada superficie específica de la bentonita, le confiere una gran capacidad tanto de absorción como de adsorción. Debido a esto se emplea en decoloración y clarificación de aceites, vinos, sidras, cervezas, etc. Tienen gran importancia en los procesos industriales de purificación de aguas que contengan diferentes tipos de aceites industriales y contaminantes orgánicos.

Desde hace tiempo las arcillas se vienen usando como excipiente por la industria farmacéutica. Debido a que no son tóxicas, ni irritantes, y a que no pueden ser absorbidas por el cuerpo humano se utilizan para la elaboración de preparaciones tanto de uso tópico como oral. Se utiliza como adsorbente, estabilizante, espesante, agente suspensor y como modificador de la viscosidad.

Se utiliza además como soporte de productos químicos, como por ejemplo herbicidas, pesticidas e insecticidas, posibilitando una distribución homogénea del producto tóxico.

Algunas arcillas, como las bentonitas, son mezcladas con suelo para su utilización como material de sellado en los vertederos o cloacas, con el fin de disminuir la permeabilidad de los mismos. De esta forma se impide el escape de gases o lixiviados generados en el depósito. Esta utilidad de las bentonitas

como material de sellado se basa fundamentalmente en algunas de sus propiedades características, como son: su elevada superficie específica, gran capacidad de hinchamiento, buena plasticidad y lubricidad, alta impermeabilidad, baja compresibilidad.

Otra aplicación de las arcillas que está cobrando importancia en los últimos tiempos es su utilización como ligante en la fabricación de alimentos pelletizados para animales. Se emplea en la alimentación de pollos, cerdos, pavos, cabras, corderos, y ganado vacuno, fundamentalmente. Actúa como ligante y sirve de soporte de vitaminas, sales minerales, antibióticos y de otros aditivos.

En la rama de ingeniería la mayoría de los problemas de fundaciones y el alcance de los estudios de estabilidad de los suelos involucran el estudio de los minerales arcillosos. En muchos casos los ingenieros deben construir sus carreteras, túneles, fundaciones y muchas otras estructuras sobre suelos difíciles de cimentar, como los arcillosos, es en estos casos cuando los problemas pueden presentarse si no se conoce con anterioridad el o los tipos de arcilla sobre los cuales se realizaran dichas obras, ya que pueden originarse diferentes tipos de inconvenientes, dependiendo de la clase de arcilla y de las condiciones en las que esta se encuentra o a la que será llevada dependiendo de las solicitudes que demande la magnitud y el tipo de estructura.

Pero las arcillas no solo representan un problema para los ingenieros, ya que se han descubierto muchas aplicaciones practicas, por ejemplo algunos tipos de arcillas pueden ser utilizadas para cementar fisuras y grietas de rocas, absorbiendo la humedad para impedir que esta produzca derrumbamiento de túneles o excavaciones, para impermeabilizar trincheras, estabilización de charcas, etc.

Pero para que puedan ser utilizadas deben estar dotadas de un marcado carácter tixotrópico, viscosidad, alta capacidad de hinchamiento y buena dispersabilidad.

Algunos de los usos en este campo pueden ser los siguientes:

- Creación de membranas impermeables en torno a barreras en el suelo, o como soporte de excavaciones.
- Prevención de hundimientos. En las obras, se puede evitar el desplome de paredes lubricándolas con lechadas de bentonita.
- Protección de tuberías: como lubricante y rellenando grietas.
- En cementos: aumenta su capacidad de ser trabajado y su plasticidad.
- En túneles: Ayuda a la estabilización y soporte en la construcción de túneles. Actúa como lubricante (un 3-5 % de lodo de bentonita sódica mantenida a determinada presión soporta el frente del túnel).
- En tomas de tierra: Proporciona seguridad en el caso de rotura de cables enterrados.
- Transporte de sólidos en suspensión.

2.3 MINERALES NO ARCILLOSOS.

El suelo es un sistema de componentes múltiples constituido por las fases sólida, líquida y gaseosa, siendo la sólida la más conveniente para propósitos de caracterización, ya que para poder entender las propiedades del suelo y su comportamiento es necesario realizar una identificación cuantitativa y cualitativa de los minerales que lo componen, además de cómo están formados estructuralmente. Es por esta razón que para poder definir de mejor manera las propiedades que presentan las arcillas en estudio es necesario identificar no solo a la fracción de minerales arcillosos, si no que también es importante lograr una adecuada identificación de los minerales no arcillosos, ya que estos pueden llegar a influir de gran manera en el comportamiento de una arcilla.

Por su origen, los minerales del suelo pueden clasificarse en primarios y secundarios.

Los minerales primarios son los que no sufrieron alteraciones químicas después de su génesis, formados a temperaturas elevadas y provenientes de las rocas ígneas y metamórficas.

Los minerales secundarios son los que resultan de la descomposición de un mineral primario por reemplazo parcial de algunos de sus constituyentes o por

reprecipitación de los productos de meteorización en un espécimen nuevo, sin relación estructural con el mineral que les dio origen y además presentan un tamaño de partículas más pequeño, menor que 2.0μ hasta tamaño molecular.

Entre los minerales primarios se encuentran los silicatos cristalinos o no cristalinos, los carbonatos, sulfatos y fosfatos.

Dentro de los minerales secundarios se encuentran los minerales arcillosos y los minerales acompañantes, estos son los óxidos de hierro, aluminio, titanio y manganeso.

Los minerales secundarios fueron descritos en el Capítulo II – Sección 2.2, por lo que a continuación solo nos referiremos a los minerales primarios.

Minerales primarios

Como se menciona anteriormente los minerales primarios son aquellos que originalmente formaron parte de una roca ígnea o metamórfica y no experimentaron alteración química. Su proporción en el suelo puede variar de acuerdo al contenido original en el material parental, resistencia a la meteorización, intensidad de la meteorización, acción de agentes bióticos y otros.

Estos minerales constituyen gran parte de las fracciones gruesas del suelo (arena y limo), sin embargo minerales primarios pueden encontrarse en la

fracción arcilla gruesa (partículas entre 2.0 y 0.2 μ de diámetro), especialmente en suelos poco meteorizados.

A nivel mundial los principales minerales primarios del suelo son el cuarzo y los feldespatos. Estos minerales son los dominantes en las rocas que constituyen la corteza terrestre. Otros minerales como el olivino, anfíboles y piroxenos, se encuentran en mucha menor proporción y son considerados como minerales accesorios.

Silicatos

Los silicatos constituyen los minerales más importantes de los materiales de casi todas las rocas. En las rocas ígneas, los silicatos se forman a temperatura y presión elevadas, poseen estructuras y generalmente son anhidros, es decir que no contiene agua. Los silicatos originados en las condiciones de formación de las rocas metamórficas tienen estructuras menos densas y generalmente incluyen en su estructura redes de grupos hidroxilos o agua y en las rocas sedimentarias normalmente hay silicatos que son transformaciones de otros anteriores, por ejemplo las arcillas deformadas por alteración de feldespatos pero también hay silicatos resistentes como el circón y la turmalina.

Las primeras clasificaciones que se hicieron de los silicatos estaban basadas en la composición química, pero cuando se descubrieron los Rayos X se vio que las propiedades cristal químicas de los silicatos se deben principalmente a las especiales características del grupo $(\text{SiO}_4)^{4+}$, que es la unidad fundamental de

los silicatos, y al tipo de estructura que resulta de sus uniones por lo tanto la clasificación de los silicatos hoy esta generalizada y siempre es una clasificación estructural.

Desde el punto de vista estructural las uniones entre los tetraedros fundamentales de los silicatos provienen de la polimerización, que es el incremento de los puentes de oxígeno que forman las uniones entre moléculas de $(\text{SiO}_4)^{4-}$, siendo su variedad el resultado de las posibles maneras que estos tetraedros tienen para unirse consigo mismos y con otros grupos. Al aumentar el grado de polimerización se van formando unidades cada vez más complejas entre estos tetraedros, dando origen a los distintos tipos estructurales de los silicatos que se dividen en 6 subclases:

Nesosilicatos: la raíz significa isla, por eso en los nesosilicatos los tetraedros están en forma individual en la estructura y unidos entre sí por cationes.

Sorosilicatos: soro significa montón, los tetraedros se unen por un vértice compartiendo un oxígeno.

Ciclosilicatos: ciclo significa círculo, los tetraedros se unen formando círculos planos y aislados.

Inosilicatos: ino significa fibra o hilo, los tetraedros se unen formando cadenas sencillas o dobles indefinidas.

Filosilicatos: filo significa hoja, los tetraedros están dispuestos en planos reticulares bidimensionales indefinidos. Estos planos reticulares están unidos entre si por cationes y a veces por grupos OH o moléculas de H₂O.

Tectosilicatos: tecto significa constructor, en ellos los tetraedros se unen entre si formando una razón tridimensional que puede tener o no valencias libres.

De las muestras analizadas por medio del método de difracción de Rayos "X", se lograron identificar minerales no arcillosos pertenecientes a los subgrupos de los inosilicatos y de los tectosilicatos, de los cuales haremos una breve descripción.

Inosilicatos.

Esta subclase comprende un número de minerales muy importante, los más abundantes después de los tectosilicatos. En ellos los tetraedros se unen formando cadenas al compartir los oxígenos y estas cadenas se unen lateralmente formando cadenas dobles. En la estructura de cadena sencilla 2 de los 4 oxígenos de cada tetraedro son compartidos con los tetraedros vecinos, mientras que en la estructura de cadena doble la mitad de los tetraedros comparten 3 oxígenos y la otra mitad solo 2. Los minerales que pertenecen a estas estructuras son el grupo de los piroxenos y el grupo de los anfíboles respectivamente. Entre estos dos grupos de minerales existe una gran similitud

en propiedades físicas, químicas y cristalográficas, siendo todos monoclinicos o rómbicos. En estos grupos aparecen los mismos cationes pero la presencia de los grupos OH es característica de los anfíboles, por lo que el color, el brillo y la dureza son muy parecidos entre las dos especies, pero el peso específico y el índice de refracción es mas bajo en los anfíboles. Los cristales tienen a menudo diferente hábito, el piroxeno se presenta en cristales gruesos y cortos y los anfíboles en prismas alargados aciculares o fibrosos.

Entre los minerales del grupo de los inosilicatos que hemos identificados en las muestras se encuentran los piroxenos (Augita).

Grupo de los piroxenos

Su estructura consiste en una cadena sencilla de tetraedros que comparten dos de los cuatro oxígenos. En el grupo de los piroxenos se incluyen minerales con simetría rómbica, llamados ortopiroxenos que son piroxenos de Mg-Fe, y un gran grupo de piroxenos monoclinicos, que tienen una composición química muy variada. Todos los piroxenos monoclinicos se pueden considerar como fases de un sistema de cuatro componentes, podemos dividirlos en dos grupos: piroxenos de Ca y piroxenos de Na, a su vez podemos subdividirlos en dos subgrupos, de Ca-Na y de Li. Como estos minerales suelen llevar muchas sustituciones en su composición química, para indicar cantidades inusuales de

un constituyente particular se le añade un adjetivo calificativo, por ejemplo se habla de augita cálcica, augita titánica, etc.

Los piroxenos aparecen en cristales de gran tamaño, son cristales prismáticos cortos de sección cuadrada u octogonal, también granular o en masa, con brillo vítreo. La alteración de los piroxenos es muy frecuente y su producto de alteración son los anfíboles que aparecen con la misma orientación que el piroxeno.

Tectosilicatos

Esta subclase comprende minerales muy importantes por su abundancia. Estructuralmente se caracterizan porque los tetraedros SiO_4 se unen entre si en el espacio compartiendo los cuatro oxígenos dando lugar a un armazón tridimensional en el que la relación Si:O es 1:2. Los minerales mas sencillos son los del grupo de la sílice que, aunque es un óxido en su composición química, se incluye en los tectosilicatos y no en los óxidos por su tipo de estructura. Todos los demás tectosilicatos llevan Al_3 remplazando al Si_4 en los tetraedros. Los minerales de esta subclase son de colores claros siempre que estén libres de inclusiones porque en ellos no entran iones cromóforos como el Fe o Mg. Son minerales de densidades bajas y dureza de 4 a 6.

Principales grupos.

Grupo de la sílice:

En este grupo se incluyen todos los minerales con una estructura de tetraedros SiO_4 , pero existen diferentes formas en las cuales los tetraedros comparten todos los oxígenos construyendo una red tridimensional eléctricamente neutra. Estas formas se conocen con el nombre de los polimorfos conocidos de la sílice: cuarzo, tridimita, cristobalita, estisovita, coesita y keatita. Además de estas formas polimórficas existen otras dos sustituciones amorfas y que están relacionadas con ellas, las cuales son la lechatelierita, que es un vidrio silícico de composición variable, y ópalo que es la forma de sílice hidratada amorfa.

El cuarzo es el más abundante y aparece en todas las rocas. La tridimita y la cristobalita son frecuentes en rocas volcánicas. Las otras tres son productos que se sintetizan en el laboratorio.

Cuarzo: presenta dos modificaciones, la de alta temperatura que es hexagonal y la de baja con ejes ternarios. La composición química del cuarzo es muy constante pero suele tener inclusiones, inclusiones sólidas de rutilos, circones, etc. y también inclusiones líquido-gaseosas que aparecen como burbujas y pueden ser bifásicas (líquido y gas) o trifásicas (líquido, gas y sólido). El cuarzo es muy abundante, la forma más típica son prismas hexagonales con terminación en dos romboedros que se distinguen porque las caras contiguas

no son iguales, son iguales las alternas, a veces parecen bipirámides con estrías horizontales en las caras prismáticas y también son frecuentes en las terminaciones caras de bipirámides y caras de trapezoedros. El cuarzo se puede encontrar en todas las rocas; plutónicas, metamórficas y sedimentarias. Es muy abundante es en los filones hidrotermales donde tenemos prácticamente cuarzo y otros minerales.

Las variedades de cuarzo se clasifican según el tamaño de los cristales:

Macrocrystalinas:

Fibrosas: cristal de roca es cuarzo puro incoloro, transparente y bien cristalizado; cuarzo ahumado es de color gris o negro conservando la transparencia (el color parece ser debido a la presencia de sustancias radioactivas); Entre estos se pueden mencionar los jacintos de Compostela que son cristales de cuarzo pequeños de color rojo, llevan Fe^{3+} , la amatista es una especie de cuarzo de color morado claro, también lleva Fe; amarillo o citrino de color amarillo, muchas veces son amatistas decoloradas.

Granulares: lechoso blanco más o menos translucido; rosa debido a trazas de Ti o Mg.

Microcristalinas:

Fibrosas: el nombre genérico que se las da a estas variedades es calcedonia que recibe distintos nombres según la textura, estructura o coloración: Se le da el nombre de ágata cuando son bandas concéntricas de distinta coloración; ónice cuando son bandas planas con distinto color; ágata musgosa a la calcedonia blanca que tiene inclusiones de agregados dendríticos de óxidos de Fe o Mg; cornalina y sarda a la calcedonia roja; crisoprasa a la calcedonia verde manzana, lleva níquel.

Granulares: son las más impuras y se llaman *sílex* o *jaspe*, tienen distintas coloraciones.

Tridimita y Cristobalita: tienen el mismo aspecto que el cuarzo, no se identifican en medios microscópicos y siempre aparece en cavidades de rocas volcánicas.

Ópalo: la forma de sílice hidratada prácticamente amorfa, solo al microscopio electrónico muestra un apilamiento compacto, mas o menos regular de bolas de sílice cementadas entre si pero dejando grandes cavidades donde se alojan moléculas de H₂O. La proporción de H₂O es variable, los que se llaman ópalos nobles tienen entre un 6 y un 10% de agua y los ópalos a secas hasta con un 20%. Las formas del ópalo son las mismas que las variedades microcristalinas granulares del cuarzo pero mas blando y con menor peso específico. Los colores igual, blancos, grises, marrones, etc. Siempre se deposita a baja

temperatura a partir de H₂O que contiene sílice por eso puede aparecer en grietas o cavidades de cualquier roca.

Grupo de los feldespatos:

Forman el grupo de minerales más abundante y amplio de la corteza terrestre, todos son aluminosilicatos de Na, K, Ca y Ba. y son constituyentes fundamentales de las rocas ígneas. Por su composición química, y dependiendo del elemento que acompañe al aluminio en su estructura los feldespatos se dividen en dos grandes grupos: el grupo de la ortosa (monoclínicos) o feldespatos potásicos, y el grupo de las plagioclasas (triclínicos) o feldespatos sódicos-cálcicos.

En la serie de los feldespatos potásicos se encuentran:

Ortosa: que es un silicato aluminico potásico. Entre las ortosas, existen diferentes variedades, siendo la más pura la adularia o "piedra luna", que posee una característica muy especial llamada adularescencia, producida por el fenómeno de interferencia de la luz proporcionándole un resplandor azulado o blanquecino único.

Sanidina: llamada también feldespato vítreo, es otro mineral propio de los feldespatos potásicos son muy poco abundantes, de color blanquecino, incoloro o rosáceo. El resto de las ortosas nobles se identifican con su color amarillo y

transparente, aunque por su poca dureza no son muy utilizadas en joyería.

Microclina: de igual composición que las ortosas, de color blanco o amarillo, aunque la más apreciada es la amazonita de color verde o verde azulado vetado de finos hilos blanquecinos, deben su color a centros de color e impurezas.

Albita: silicato alumínico sódico. Presenta dos variedades diferenciadas por su aspecto. La cleavelandita son tablillas delgadas y la periclina son prismas alargados. Pueden ser incoloras blancas o amarillentas.

Anortita: silicato alumínico cálcico. De color parduzco, amarillento o incoloro. De estructura laminar o granulada, son muy frecuentes las maclas.

Plagioclasas: es el grupo de silicatos alumínicos de sodio y calcio variando las proporciones de éstos elementos, forman una serie isomórfica comprendida entre la albita y la anortita, con muchas características comunes de ambas. Dentro de la serie, se distinguen las siguientes variedades:

Oligoclasa: su variedad más importante es la piedra sol, de color anaranjado o rojizo, con un efecto de hermosos reflejos producidos por multitud de láminas de oligisto y pequeñas fracturas interiores.

Andesita: piedra volcánica de reciente formación sin importancia en gemología.

Labradorita: raramente aparece en cristales bien formados, generalmente en

masas informes exfoliables. Con brillo nacarado casi opaco, incolora o gris, a menudo con vivos reflejos de colores rojos, amarillos, verdes, azules y violetas.

Bitownita: muy semejante en sus brillos a la anterior, mezclada con la anortita. Es frecuente la aparición de asociaciones no mezcladas de ortosas con plagioclasas, formando bandas paralelas (semejantes a las ágatas). Se denominan pertitas (ortosa pertítica y amazonita pertítica).

Sus propiedades: Al tratarse de un grupo con series isomórficas, las propiedades físicas y ópticas son muy variables de unos individuos a otros, dependiendo de la composición puntual de cada caso. La dureza es una de las constantes en todo el grupo, ya que oscila en todos los casos entre 6 y 6,5 en la escala de Mohs, con exfoliación perfecta o muy buena en dos direcciones que se cortan a 90°, y las fracturas son concoideas, astillosas o desiguales. La densidad varía en las plagioclasas dependiendo del mayor contenido en calcio, aumentando ligeramente el peso específico de 2,6 a 2,7. en las ortosas y microclinas, el peso específico es ligeramente inferior con un valor medio de 2,55.

Son infusibles a la llama la sanidina y las microclinas, mientras que el resto lo hace con dificultad, siendo más fácil en el caso de las plagioclasas. Todas son solubles en ácido fluorhídrico y las plagioclasas se disuelven en clorhídrico más fácilmente cuando mayor es el contenido en calcio.

El brillo es vítreo nacarado en todo el grupo variando la transparencia según los individuos. Todos ellos al pertenecer a los sistemas monoclinico y triclinico son anisotropos biáxicos con unos índices de refracción medio bajos, son inferiores en las ortosas y superiores en las plagioclasas. La birrefringencia es bastante constante. No presentan espectros típicos ni fluorescencia.

Las plagioclasas se clasifican según el porcentaje molecular de anortita: se llama *albita* desde 0 a 10%, *oligoclasa* de un 10% a 30%, *andesina* de un 30% a 50%, *labradorita* de 50 a 70%, *bitownita* de 70% a 90% y *anortita* de 90 a 100%.

Tanto los feldespatos alcalinos como las plagioclasas se alteran fácilmente por procesos de erosión o hidrotermal. Los feldespatos alcalinos se alteran dando lugar a caolinita y sericita, mientras que las plagioclasas a zoisita.

2.4 CONSISTENCIA DEL SUELO.

Como hemos visto anteriormente, la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y del transporte (AASHTO) da cuatro clasificaciones de suelos, los cuales tienen diferentes propiedades dependiendo de su clasificación en particular. El tipo de suelo en estudio es el definido por la AASHTO como arcilla, el cual posee dos grandes propiedades mencionadas a continuación:

- 1) Cohesión: que se define como la fuerza de atracción entre partículas adyacentes dentro de un mismo cuerpo.

- 2) Plasticidad: capacidad que tiene un suelo de ser deformado.

El científico sueco Albert Mauritz Atterberg a principios de los años 1,900; estudió la plasticidad de las arcillas; en el desarrollo de sus ideas y a medida realizaba diferentes ensayos a suelos arcillosos, observó que presentaban ciertas características cuando el suelo era mezclado con el agua. Con una gran cantidad de agua el suelo se volvía semejante a un fluido apenas viscoso, a medida que el suelo perdía humedad por la evaporación del agua, llegaba al estado de un fluido con cierta rigidez presentado pegajosidad. Con la evaporación de la mayor cantidad de agua la pegajosidad desaparecía y el

suelo podía ser deformado a su voluntad. Llegaba a un punto en donde la capacidad de deformación se perdía.

De todas estas observaciones Atterberg llegó a concluir que el suelo pasaba por diferentes “Estados de Consistencia” los cuales definió así:

- Estado Líquido: cuando las partículas de suelo permanecen en suspensión.
- Estado Semilíquido: cuando el suelo tiene las características de un fluido viscoso
- Estado Plástico: cuando el suelo se puede moldear y deformar sin exhibir propiedades elásticas, cambios de volumen ó agrietamiento
- Estado semisólido: cuando el suelo ya no se puede moldear pero cambia de volumen cuando se disminuye su contenido de humedad
- Estado sólido: cuando el suelo ya no presenta cambio de volumen al disminuir su contenido de humedad

Atterberg sintió la necesidad de definir las fronteras ó características que presentaba la arcilla cuando se encontraba por cambiar de un estado a otro, tales fronteras las definió así:

- El mayor límite de un fluido viscoso, con el que una mezcla de arcilla y agua fluye casi como el agua
- El menor límite de un fluido viscoso, el “Límite Líquido”, donde dos secciones de suelo amasado, puestos en un recipiente cóncavo, apenas se tocan bajo el impacto de varios golpes secos
- El “Límite de pegajosidad” en el cual la arcilla pierde las propiedades adhesivas y cesa la pegajosidad con otros objetos, como por ejemplo: hojas metálicas, cuchillas de arado, etc.
- El “Límite de Cohesión”, en el cual los granos de suelo cesan de unirse unos con otros
- El menor límite del estado plástico, ó “Límite Plástico”, donde un suelo se deshace ó desmorona y/o presenta fisuras de contracción cuando es rolado en bastoncitos de aproximadamente 3 mm de diámetro.

- El menor límite de cambio de volumen ó “Límite de Contracción”, en que la pérdida de humedad no causa pérdida de volumen.

Todo lo dicho anteriormente podemos resumirlo en la figura 2.4.1 que mostramos a continuación:

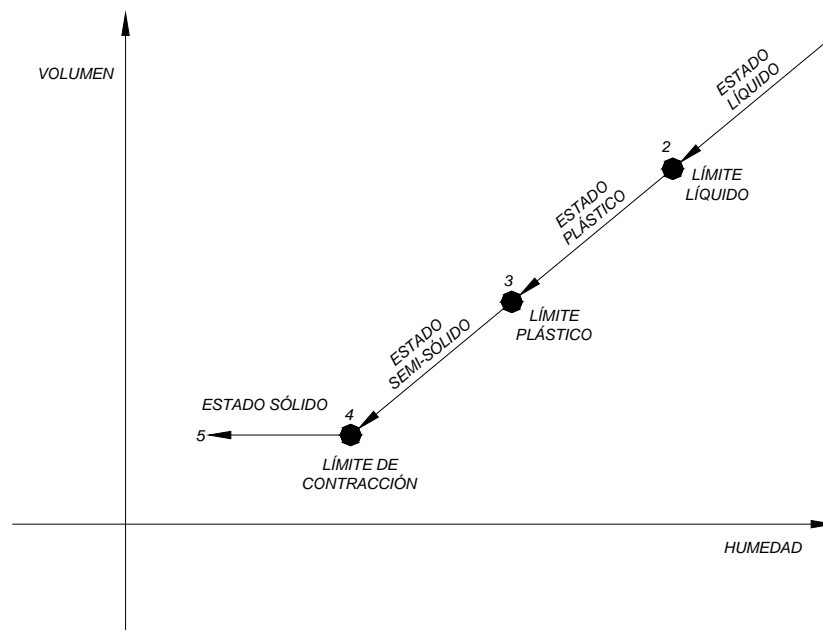


Figura 2.4.1: Estados de consistencia, con respecto a la humedad, de un suelo arcilloso.

Para poder cuantificar la plasticidad de un suelo, Atterberg consideró la cantidad de agua que había que agregarle al suelo arcilloso para poder hacerlo pasar de un estado a otro; con esto definió que la medida de la plasticidad de un suelo es el contenido de humedad, expresado en porcentaje, del suelo en un estado en particular.

También encontró que la diferencia entre el límite líquido y el índice plástico representaba una medida satisfactoria del grado de plasticidad de un suelo cuando es relacionado con el agua incorporada. Luego sugirió que estos dos límites servían de base en la clasificación de los suelos plásticos.

Cabe mencionar que hemos mencionado seis límites identificados por Atterberg para un suelo arcilloso, pero para propósitos de la geotécnica, los límites más importantes y los únicos que se definen en un estudio de suelos, son el límite líquido, el límite plástico y el límite de contracción.

SIGNIFICADO FÍSICO DE LA PLASTICIDAD DE UN SUELO.

Muchos estudiosos del tema atribuyen la plasticidad a las partículas escamosas de tamaño coloidal presentes en los suelos. Además de ser las responsables de la alta compresibilidad y la baja permeabilidad de los suelos.

El científico noruego, de origen suizo, Victor Moritz Goldschmidt consideró la hipótesis que las partículas escamosas actúan como condensadores, orientando las moléculas de agua distintamente en forma bipolar. El campo eléctrico que rodea cada partícula influencia la mayor parte de moléculas de agua.

Las primeras capas de moléculas de agua cercanas a la superficie sólida, están particularmente ligadas tan fuertemente que no se pueden mover en absoluto. Goldschmidt supone que el espesor relativamente grande de la capa de agua influenciada por el campo eléctrico de una partícula es responsable de la plasticidad.

Si la hipótesis de Goldschmidt es correcta, otros líquidos que tengan moléculas bipolares también deberían producir plasticidad si se la mezclara con arcilla en polvo, mientras que líquidos con moléculas mono-polares no deberían producir este efecto. Experimentos de Atterberg demostraron que, cuarzo molido de tamaño menor de 2 micrones no presenta plasticidad en absoluto, mientras que mica molida del mismo tamaño, presenta cierta plasticidad que se incrementa con el decrecimiento del tamaño de los granos. Este hecho muestra la influencia de las partículas escamosas en la plasticidad de los suelos. Casagrande (1938) ha sugerido que la responsable de la plasticidad de los suelos es el agua de adsorción, cuya viscosidad es semejante a la de una goma líquida.

LÍMITE LÍQUIDO.

La determinación del límite líquido ha estado sujeta a distintas variaciones, fue Karl Terzaghi, quien le sugirió a Arthur Casagrande en el año de 1,927, que diseñara un dispositivo mecánico con el cual se garantizara que los errores del operador fueran mínimos a la hora de realizar el ensayo. Fue así como Arthur

Casagrande desarrolló el dispositivo mostrado en la figura 2.4.2 y descrito por la norma ASTM D 423.

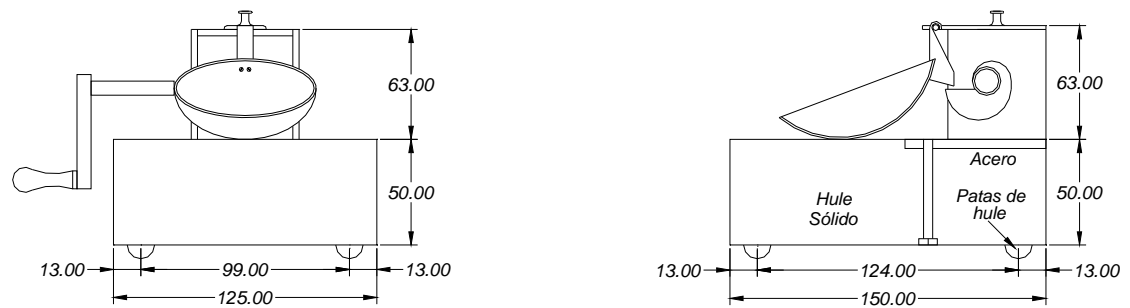


Figura 2.4.2: Copa de Casagrande para la determinación del límite líquido

El acanalador mostrado en la figura 2.4.3, es el acanalador diseñado por Casagrande, que en general es el que debe de usarse, pues con él se obtiene siempre la misma altura de los “taludes” formados (figura 2.4.6).

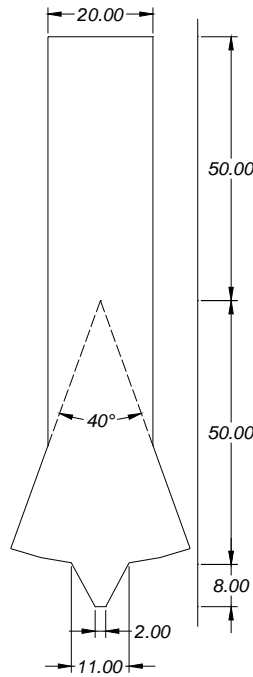


Figura 2.4.3: Acanalador diseñado por Casagrande

El acanalador de la figura 2.4.4 es el diseñado por la ASTM, y tiene el inconveniente de no controlar la altura de taludes formados. Según Fernández Ventura (1,967) este acanalador nos da valores del límite líquido inferiores al de Casagrande; la ventaja que posee este acanalador es que, con el uso, se desgasta mucho menos que el de Casagrande.

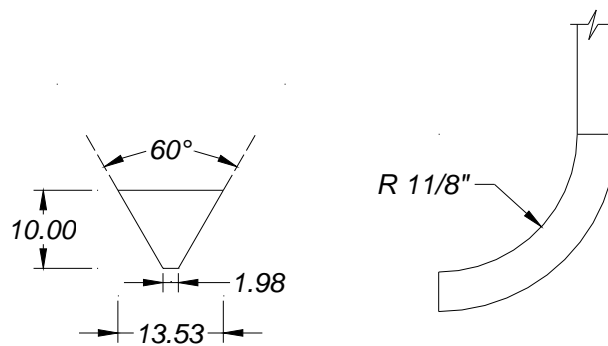


Figura 2.4.4: Acanalador diseñado por la ASTM

En suelos poco plásticos, el acanalador de Casagrande puede empujar una porción considerable de suelo fuera de la cuchara. Aun teniendo el máximo cuidado, este acanalador produce en esos suelos secos taludes muy irregulares.

Hovanyi (1,958) diseñó un acanalador para producir taludes de igual magnitud que el de Casagrande; pero que es hueco interiormente, por lo cual permite la creación de taludes regulares en suelos poco plásticos. La figura 2.4.5 muestra el acanalador diseñado en el laboratorio José Luis Escarnio en España, siguiendo la idea de Hovanyi.

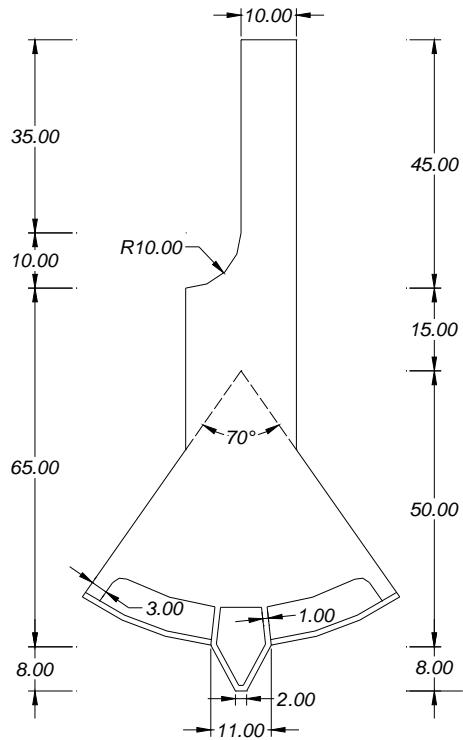


Figura 2.4.5: Acanalador diseñado en el laboratorio José Luis Escarnio para suelos con poca plasticidad.

El límite líquido se definió como el contenido de humedad de un suelo cuando, para 25 golpes ejercidos por la caída de la copa (con una razón de 2 golpes por segundo) desde una altura de 1 cm, dos secciones determinadas de suelo separadas por una ranura normalizada de 2 mm de espesor en su parte inferior y 11 mm en su parte superior y una altura de 8 mm, cerraran en una distancia de ½ pulgada a lo largo de la parte inferior de la ranura.

La altura de caída, como las dimensiones de la copa y las dimensiones de la ranura, como el material de la base, etc.; son factores de influencia en los resultados obtenidos; Casagrande advirtió la importancia que tiene en los resultados la naturaleza de la base sobre la que golpea la cuchara. Los americanos utilizamos desde 1,945, un plástico llamado Micarta número 221, fabricado por Westinghouse.

Arthur Casagrande llegó a la conclusión de que era necesario normalizar la resistencia dinámica de las bases. Para ello es preciso que, dejando caer sobre ella una bolita de acero de 7.94 mm de diámetro desde una altura de 25 cm, la altura de rebote este comprendida entre el 75% y el 90%. En Gran Bretaña se usa una base algo más blanda, por lo que, en los ensayos realizados en este país se obtienen valores más elevados del límite líquido.

El ensayo por medio del dispositivo de Casagrande se basa en la teoría que para golpes secos, la resistencia al corte dinámica de los taludes de la ranura se agota, generándose una estructura de flujo que produce un deslizamiento según lo muestra la figura 2.4.6. La fuerza resistente a la deformación puede considerarse como la resistencia al corte de un suelo. La resistencia al corte de todos los suelos en el límite líquido es constante y tiene un valor aproximado de 22g/cm².

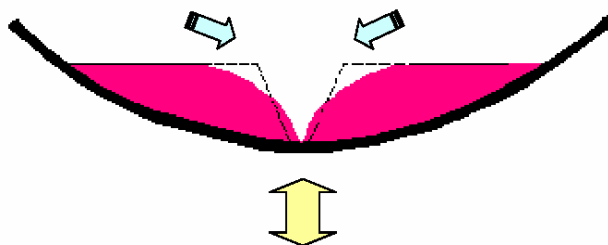


Figura 2.4.6: Deslizamientos de los taludes formados en la copa de Casagrande, debido a la generación de la estructura de flujo por golpes secos.

LA CURVA DE FLUJO.

El límite líquido, como se definió anteriormente, tiene la condición de encontrar la humedad exacta para una resistencia al corte de aproximadamente 25 g/cm^2 . En la práctica realizar un ensayo en el que exactamente llegemos a la humedad antes descrita, es muy complicado por no decir imposible. Es por esto que Casagrande analizó esta situación y llegó a la conclusión que si se aumentaba el contenido de humedad, el número de golpes para cerrar la ranura era menor y que al graficar el contenido de humedad en escala aritmética vrs el número de golpes en una escala logarítmica, siempre resultaba una línea recta. A dicha recta le dio el nombre de Curva de Flujo (figura 2.4.7), teniendo la ventaja de detectar más fácilmente los errores del operador y de ser dibujada con pocos puntos.

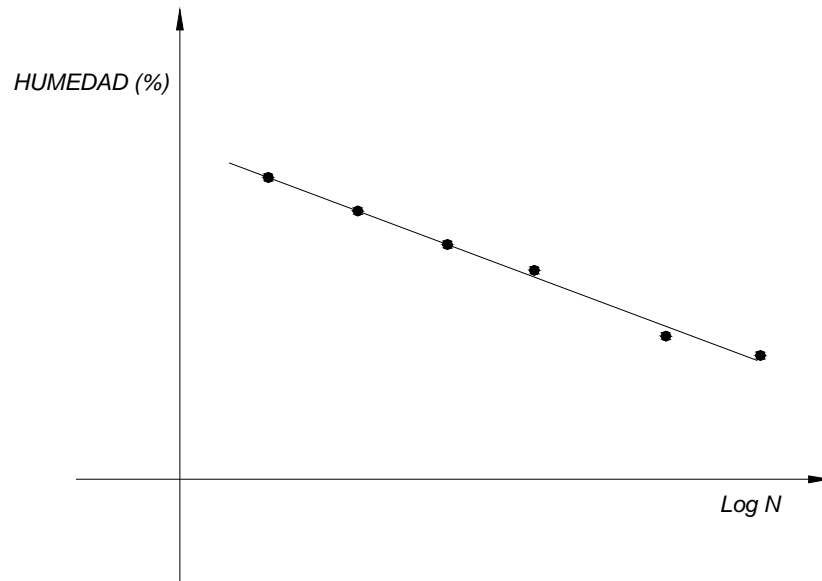


Figura 2.4.7: Curva de flujo, definida por Arthur Casagrande.

Esta curva puede ser representada por la siguiente ecuación:

$$\omega = -F \text{Log}(N) + C \quad \text{Ecuación 2.4.1}$$

Donde:

ω : contenido de humedad en porcentaje de suelo seco.

F : constante, llamada “índice de flujo”.

N : numero de golpes.

C : constante.

El número de golpes “N” puede ser considerado como representado por la fuerza igual a N veces la fuerza ejercida en la aplicación de un solo golpe. La resistencia al corte de un suelo es obviamente proporcional a la fuerza requerida para producir una deformación dada (en nuestro caso el cierre de la ranura). Entonces, el número de golpes “N” de la ecuación 2.4.1, puede ser tomado como proporcional a “s”, la resistencia al corte de un suelo, y puede ser escrita como:

$$\omega = -F \log(s) + C1 \quad \text{Ecuación 2.4.2}$$

Donde:

“C1” es diferente a “C” debido a que “s” está expresado en unidades físicas.

Es de aclarar que los valores que toman las constantes C y C1 dependen del tipo de arcilla en estudio.

METODO DE UN PUNTO.

La necesidad de ejecutar muchos ensayos de límites líquidos llevaron a desarrollar un método de determinación que tuviese conexión con la curva de flujo, ya que comentarios de Casagrande decían que suelos de una misma muestra deberían tener curvas de flujo con pendiente constante.

La U.S. Waterways Experiment Station realizó estudio sobre 767 ensayos de límite líquido correspondientes a suelos aluvionales y suelos costeros del Valle de Mississippi (4). La formula general desarrollada como resultado del estudio fue:

$$LL = \omega \left(\frac{N}{25} \right)^{\tan \beta} \quad \text{Ecuación 2.4.3}$$

Donde:

“tan β” es la pendiente de la curva de flujo en escala doble logarítmica y “ω” es la humedad correspondiente al número de golpes “N” obtenido en la determinación de un punto mediante el cascador de Casagrande. Esta curva de flujo se transforma en una recta.

El valor obtenido de tan β para 432 ensayos de suelos aluvionales fue de 0.115. Para los 136 ensayos de los suelos del Oeste del Valle fue de 0.125 y para los 135 ensayos de los suelos del Este del Valle fue de 0.130. Para los 767 ensayos realizados en todo el proyecto, el valor promedio obtenido fue de 0.121 con una desviación estándar de ±0.032.

Lo que significa que todos los suelos no poseen exactamente la misma pendiente pero están cerca de un valor medio.

Finalmente se concluyó, que el método de un punto podía ser usado si el número de golpes N utilizado en la formula estuviese comprendido entre 15 a 40 golpes. En la determinación del límite líquido por el método de un punto, W. J. Eden (7) propone multiplicar la humedad obtenida “ ω ” para cierto numero de golpes “N” por un actor de corrección “Cn” como se muestra en la Tabla 2.4.1, suponiendo que la pendiente de la curva de flujo es constante (0.100) para todos los suelos excepto para suelos con gran contenido de materia orgánica o cuando se requiera una exactitud especial en la determinación.

EFFECTO DE LA SATURACIÓN

“N”	“Cn”	“N”	“Cn”	“N”	“Cn”	“N”	“Cn”
15	0.950	20	0.977	26	1.004	31	1.022
16	0.955	21	0.983	27	1.008	32	1.025
17	0.962	22	0.987	28	1.012	33	1.028
18	0.968	23	0.992	29	1.015	34	1.031
19	0.973	24	0.996	30	1.019	35	1.034

Tabla 2.4.1: Factor de corrección que debe de aplicarse por el efecto de saturación.

De acuerdo a investigaciones realizadas por Raymond F. Dawson, observó que el efecto del tiempo de saturación de la muestra modificaba los valores obtenidos de límite líquido con respecto a los valores obtenidos si no se dejara saturar la muestra.

Los resultados de una serie de ensayos sobre dos suelos diferentes realizados con distintos períodos de saturación, se graficaron como se muestra en la figura 2.4.8. Para el Suelo N°2, el límite líquido se redujo desde aproximadamente 70% a alrededor de 63%, donde la mayoría del efecto de reducción se produjo durante la primera hora de saturación. Para el suelo N°1, el límite líquido se redujo desde 50% a 45%, donde la mayoría del efecto se produjo en las primeras 8 horas de saturación. El mayor efecto producido por la saturación de la pasta de suelo no se produce en un período determinado de tiempo para diferentes tipos de suelo, variable hasta hoy desconocida. Lo que si se puede afirmar, es que a partir de las 12 horas de saturación de la pasta de suelo, los resultados obtenidos por un mismo operador sobre distintos suelos, no varían con el tiempo de saturación. Con estos resultados publicados, resulta importante incorporar el efecto de saturación a la metodología de ejecución del límite líquido.

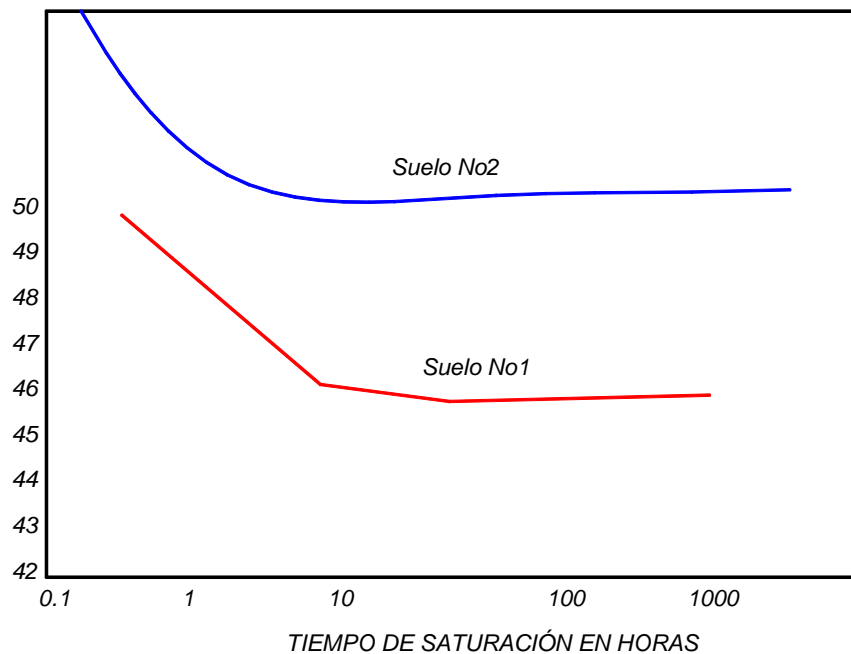


Figura 2.4.8: efecto de la saturación en muestras de arcillas, afectando su límite líquido

EFFECTO DEL SECADO.

Otro parámetro importante de mencionar es el secado al que son sometidas las muestras, siendo el método aceptado en la actualidad, el de las muestras secadas al aire; ya que diferentes pruebas han demostrado que muestras secadas al horno dan un valor de límite líquido por debajo de un 30% del reflejado por una muestra secada al aire. El mayor efecto producido por el secado lo sufren los suelos con mayor cantidad de materia orgánica.

MÉTODOS ALTERNATIVOS EN LA DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO.

ENSAYOS DE PENETRACIÓN.

Partiendo desde el año de 1,911 con el procedimiento original diseñado por el mismo Albert Atterberg, el cual nos daba resultados fuertemente influenciados por el operador; y la mecanización en 1,932 del ensayo por Arthur Casagrande en donde se minimizó los errores del operador, en la actualidad casi universalmente la copa de Casagrande es el dispositivo para la determinación del límite líquido de las muestras de arcilla. Sin embargo, a pesar de que el dispositivo se encuentre normado, se genera un importante número de errores en la ejecución del ensayo: la dificultad de realizar la ranura en ciertos suelos arenosos, la tendencia de los suelos de baja plasticidad de deslizar por la cuchara en lugar de fluir, sensibilidad de pequeñas diferencias en el aparato (forma del acanalador, dureza de la base, la rugosidad de la cuchara, etc.), la sensibilidad de la técnica del operador en realizar el ensayo, etc.

Esencialmente el ensayo de límite líquido es una medida de la resistencia de corte de un suelo blando cuya humedad se acerca al estado líquido. La teoría de plasticidad desarrollada por Prandtl estableció una relación entre la resistencia de corte y la resistencia a penetración de un suelo. Esta relación es una constante en materiales como las arcillas saturadas. Entonces podemos

decir que el ensayo de penetración debería ser una medida válida de límite líquido. Para ello existen distintos tipos de conos para determinar el límite líquido los cuales se describen a continuación:

EL CONO RUSO: Inicialmente se usó la aguja de Vicat y conos estrechos. Aparentemente esos ensayos no proveían resultados satisfactorios. El primer ensayo estandarizado fue el mencionado por Vasilev en 1,949, donde el aparato empleado es el mostrado en la figura 2.4.9, donde una penetración de 10mm indica el límite líquido.

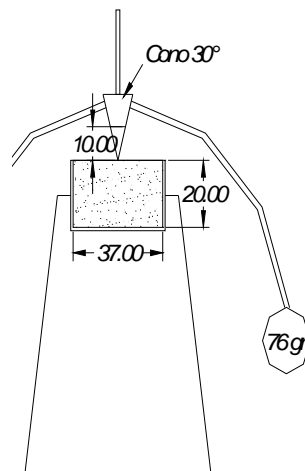


Figura 2.4.9: El cono Ruso para la determinación del límite líquido.

EL CONO HINDÚ: El desarrollo de un ensayo simplificado de límite líquido por el Indian Central Road Research Institute comenzó en 1,953 y concluyó con el

dispositivo mostrado en la figura 2.4.10, donde una penetración de una pulgada indica el límite líquido.

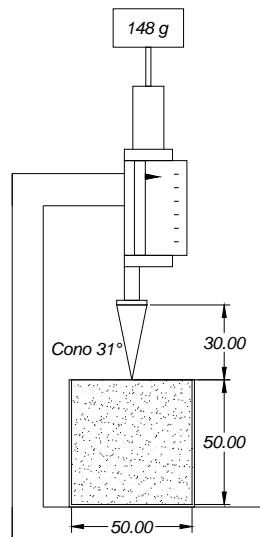


Figura 2.4.10: El cono Hindú para la determinación del límite líquido.

EL CONO DEL GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY: Experimentos para un ensayo simplificado de límite líquido condujo en 1,951 al Georgia Institute of Technology a encontrar un método de penetración. El penetrómetro utilizado es el mostrado en la figura 2.4.11, donde una penetración de 10mm indica el límite líquido.

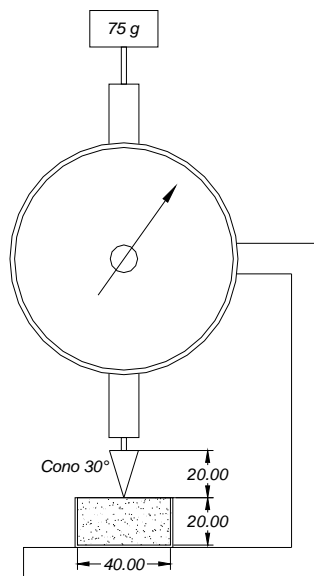


Figura 2.4.11: El cono del Georgia Institute of Tecnology para la determinación del límite líquido.

LÍMITE PLÁSTICO.

Para la determinación del límite plástico se hace necesario rolar bastoncitos de arcilla, con un contenido de humedad que se encuentre arriba de este límite (en su estado plástico), sobre una placa de vidrio para generar la pérdida de humedad hasta llegar al desmoronamiento del bastoncito según se muestra en la figura 2.4.12; Atterberg no dio ninguna especificación del bastoncito fue Terzaghi quien agregó la condición que el bastoncito tuviese un tamaño de 1/8 de pulgada ó 3 mm. Este método hasta el día de hoy se realiza manualmente ya que el operador ajusta automáticamente la presión necesaria de rolado en función de la resistencia de cada suelo.

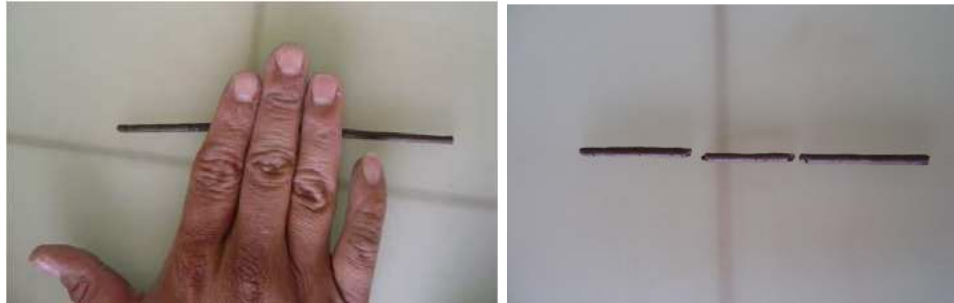


Figura 2.4.12: Rolado de bastones de arcilla para hacerlos llegar a su límite plástico.

MÉTODOS ALTERNATIVOS EN LA DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO.

MÉTODO DEL CUBO (según J.C. Russell): este método fue originalmente inventado por J. C. Russell, del Departamento de agronomía de la Universidad de Nebraska, para ser usado en ensayos de suelos para propósitos de agricultura. El método consiste en moldear un suelo húmedo en forma de un cubo de aproximadamente $\frac{3}{4}$ de pulgada. Este cubo debe ser deformado bajo la presión de los dedos o bajo la presión de una espátula sobre un vidrio o mármol. Luego el suelo vuelve a ser moldeado quitándole humedad hasta lograr que bajo la presión ejercida, el cubo se deforme y comience a agrietarse. El contenido de humedad del suelo correspondiente a ese momento es considerado el límite plástico.

MÉTODO DEL CUBO (según el departamento de caminos de Nebraska): la esencia de este método es la misma que el del J.C. Rusell, la diferencia consiste en el tamaño del cubo utilizado el cual es el más pequeño con un tamaño de aproximadamente ½ de pulgada y el criterio de límite plástico es el desmoronamiento del cubo.

CARTA DE PLASTICIDAD.

El límite líquido y el límite plástico son determinados por procedimientos de laboratorio relativamente sencillos y aportan una gran información al ingeniero a la hora de la determinación de las propiedades del suelo. Con estos dos parámetros se define el Índice de Plasticidad, que no es más que la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico. Casagrande estudió la correlación entre el índice de plasticidad y el límite líquido con la cual elaboró una gráfica que llamó Carta de Plasticidad (ver figura 2.4.13); en la cual aparece una línea A definida por la siguiente ecuación:

$$IP = 0.73(LL - 20) \quad \text{Ecuación 2.4.4}$$

Donde:

IP : índice de plasticidad.

LL : límite líquido.

La carta de plasticidad está dividida en cuatro partes por una recta vertical, correspondiente a un límite líquido de 50%, y por una línea A a excepción de la parte inferior donde la línea A se convierte en una banda horizontal que se extiende entre los índices de plasticidad de 4 y 7.

La línea A es un límite establecido empíricamente que separa las arcillas inorgánicas CL y CH que generalmente quedan en su parte superior, de los limos inorgánicos ML y MH, los suelos con materia orgánica coloidal OL y OH y algunos otros suelos, que generalmente quedan por debajo de la línea A.

En la zona achurada con IP entre 4 y 7 se superponen los suelos arcillosos y limosos, por lo que se emplea la doble nomenclatura CL-ML.

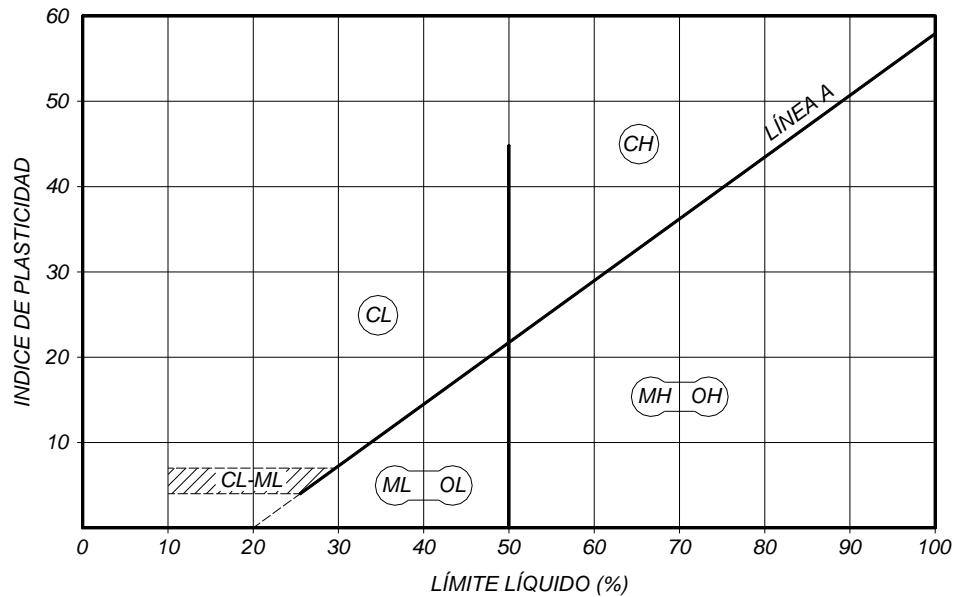


Figura 2.4.13: Carta de plasticidad.

LÍMITE DE CONTRACCIÓN.

En el estado semisólido, el proceso de pérdida de volumen del suelo es precisamente igual al valor de agua perdida por evaporación. Sin embargo cuando el contenido de humedad llega a un cierto valor mínimo, la muestra deja de disminuir su volumen con la pérdida de humedad pero el peso de la muestra continúa decreciendo.

Podemos decir que en ese punto la muestra pasa de un estado semisólido a uno sólido. El límite entre los dos estados es marcado por el cambio de color de oscuro a claro y el contenido de humedad correspondiente a dicho límite Atterberg lo denominó “límite de contracción”.

En el estado semisólido, los vacíos están completamente llenos de agua. La superficie libre de agua se localiza dentro de la superficie de la muestra y la tensión superficial ejerce en la superficie exterior de la muestra una presión distribuida uniforme, comparable a la presión externa actuando como una presión hidrostática en cada punto perpendicular a la superficie externa de la muestra. Por esta razón el aire no puede entrar en la arcilla ya que la presión ejercida por la tensión superficial es más pequeña que la presión requerida para comprimir o contraer la arcilla.

En el límite líquido la presión ejercida por la tensión superficial del agua o “presión capilar” es prácticamente igual a cero. En el límite plástico ya suma varias atmósferas y durante el proceso de contracción en el estado semisólido su valor es todavía más grande. Finalmente, llega el punto donde la fuerza requerida para producir el cambio de volumen es tan grande como el máximo valor que la “presión capilar” puede posiblemente suponer. Si se sigue evaporando agua, la superficie de agua capilar se retira al interior de la muestra y el aire puede ingresar al suelo, en consecuencia, el color del suelo cambia de oscuro a claro. El contenido de agua, cuando se produce el cambio de color, es el límite de contracción. El límite de contracción depende obviamente de dos factores: la compresibilidad del suelo y el máximo valor de presión capilar.

2.5 EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO.

El suelo y lo que está directamente debajo de éste, el subsuelo, está constituido por materiales muy complejos aunque parezcan muy simples. Muchos desconocen que los suelos se estudian desde diferentes puntos de vista. La mayoría sabemos que no todos los suelos son buenos para sembrar, pero son pocos los que saben que para construir un edificio es necesario analizar las propiedades del sitio, a esto es lo que llamamos un "estudio de mecánica de suelos" o simplemente un "Estudio de Suelos", el cual tiene como finalidad conocer si el suelo soportará el peso del edificio, si tendrá asentamientos excesivos y también si resistirá durante sismos.

Dicho estudio pretende obtener información que ayude al ingeniero geotécnico en diferentes aspectos, de los cuales podemos mencionar los siguientes:

- Seleccionar el tipo y profundidad de la cimentación adecuada para una estructura en particular.
- Evaluar la capacidad de carga admisible del suelo en estudio.
- Estimar el asentamiento que pueda tener en un futuro el suelo, debido al peso de la estructura proyectada.

- Detectar problemas en la cimentación (por ejemplo, suelo expansivo, suelo colapsable, relleno sanitario, etc.)
- Determinar, cuando sea posible, el nivel freático y el nivel de roca.
- Conocer parámetros del suelo, (como el ángulo de fricción interna, cohesión aparente, peso específico del suelo, etc.) que nos ayuden a la hora de estimar el empuje del suelo en estructuras como muros de retención, tablestacados, etc.

En la actualidad existen muchas técnicas para estudiar el suelo, lo que hace conocerlo desde diferentes puntos de vista. Cuando mayor es la calidad en las técnicas aplicadas, mayor es el costo económico que refleja el estudio. Existen proyectos que necesitan un nivel de conocimiento del suelo muy profundo, como por ejemplo la construcción de una presa; para esto se deben de aplicarse técnicas especiales, las cuales no son utilizadas comúnmente. Al contrario, cuando se proyecta la construcción de una vivienda de habitación mínima, los parámetros a conocer del suelo no son tan estrictos, realizando un estudio básico ó de rutina. Es por esto que se concluye que el tamaño del proyecto es de una gran influencia a la hora de escoger el tipo de estudio de suelo a solicitar, ya que mientras más extenso sea la investigación, mucho más costosa será desde el punto de vista económico.

INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DEL SUELO SOBRE EL PROGRAMA DE EXPLORACIÓN.

El estudio dependerá del tipo y condiciones que posea el suelo, por ejemplo, si una estructura se va a fundar encima de una capa bastante homogénea de arcilla, se puede justificar la realización de una cantidad considerable de ensayos de suelo, ejecutados por laboratoristas expertos, ya que los resultados permitirán estimar con relativa exactitud tanto el asentamiento como la velocidad con que éste se produce. Con esta previsión, puede resultar posible eliminar, con un costo razonable, el peligro de asentamientos diferenciales perjudiciales, con una distribución apropiada de las cargas. Si por el contrario, la estructura debe situarse encima de un depósito compuesto de bolsones y lentes de arena, arcilla y limo, la misma cantidad de ensayos agregaría muy poco a la información que podría obtenerse determinando solamente las propiedades índices de muestras representativas extraídas de las perforaciones de la exploración. Datos adicionales de mucho mayor significado que los que se deducirían de extensos ensayos de suelos, se podrían obtener, en menos tiempo y con menor gasto, por medio de simples ensayos de penetración en el terreno, a lo largo de líneas verticales poco espaciadas entre sí, ya que dichos ensayos pondrían en evidencia las zonas débiles que pudiera haber entre perforaciones. El descubrimiento de dichas zonas es más importante que el conocimiento exacto de las propiedades de algunas muestras tomadas al azar.

Lo que acabamos de decir nos demuestra que, si el perfil del suelo es complejo, es muy probable que un programa elaborado de ensayos de suelo se halle fuera de lugar. Por ello, los métodos para la exploración del suelo deben elegirse, de acuerdo con el tipo de perfil del subsuelo, en el mismo lugar de la construcción.

La expresión perfil del subsuelo, o simplemente perfil del suelo, indica una sección vertical a través del terreno, que muestra los espesores y el orden de sucesión de los estratos. El término estrato se aplica a una capa de suelo relativamente bien definida, que se halla en contacto con otras capas de características bien diferentes. Si los límites entre estratos son más o menos paralelos, se dice que el perfil del suelo es simple o regular. Si, por el contrario, los límites son irregulares, se dice que el perfil del suelo es errático.

Hasta una profundidad comprendida entre 1.50 y 2.00 metros, a contar de la superficie del terreno, y excepcionalmente hasta una profundidad mayor, las propiedades físicas del suelo son influidas por los cambios periódicos de humedad y temperatura así como también por los agentes biológicos, como son las raíces, los gusanos y las bacterias. La parte superior de esta región se conoce como horizonte A, y se caracteriza por estar sujeto, principalmente, a los efectos mecánicos del clima y a la pérdida por lavado de algunos de sus

elementos. La parte inferior se identifica como horizonte B y es donde se precipitan y acumulan en parte las sustancias lavadas del horizonte A.

Las propiedades de los suelos de los horizontes A y B interesan especialmente a los agrónomos y a los ingenieros viales. Los ingenieros especialistas en geotécnica se interesan más en el material situado abajo. Debajo del horizonte B, las características del suelo vienen determinadas solo por la materia prima de la cual derivan, por la forma en que se depositó y por los procesos geológicos que le siguieron. Los estratos individuales que constituyen el perfil del suelo debajo del horizonte B pueden ser bastante homogéneos, o bien estar compuestos de elementos más pequeños que tienen propiedades que se diferencian más o menos del término medio. La forma, el tamaño y la distribución de estos elementos más pequeños determinan la estructura primaria del depósito. Como la mayoría de los suelos fueron depositados bajo agua, la estructura primaria más común es la estratificación. Si las capas individuales no tienen espesores mayores de unos 2 a 3 cm y además son aproximadamente del mismo espesor, se dice que el suelo es laminar. Un ejemplo lo dan las arcillas laminares. La acción del hielo, de los deslizamientos de taludes naturales, de los ríos torrenciales y de otros agentes naturales, conduce a la formación de depósitos con una estructura errática. Cuanto más se aproxima la estructura de una masa de suelo al tipo errático, más difícil

resulta determinar valores medios para las constantes del suelo y más incierto es el resultado.

INFLUENCIA DEL TAMAÑO DEL PROYECTO SOBRE EL PROGRAMA DE EXPLORACIÓN.

Como mencionamos anteriormente, en la preparación del programa para el estudio de suelo, debe considerarse también la magnitud de la construcción. Si la construcción que se propone ejecutar implica sólo un pequeño gasto, el proyectista no debe influir en la investigación más que un pequeño número de perforaciones de reconocimiento, y unos pocos ensayos de clasificación sobre muestras representativas de los suelos. La falta de una información exacta con respecto a las condiciones del subsuelo se compensa usando en el proyecto un coeficiente de seguridad mayor. Si, por el contrario, con condiciones similares del subsuelo, hay que ejecutar una construcción de iguales características que la anterior, pero de gran volumen, el costo de una investigación completa y elaborada es generalmente pequeño, comparado con los gastos que se originarían por una falla debida a suposiciones erróneas del proyecto. Por ello, por lo común, en proyectos de importancia, las investigaciones minuciosas, del subsuelo se justifican económicamente.

Para poder adaptar el programa de exploración a los requerimientos de una obra dada y obtener los datos esenciales con un mínimo de tiempo y dinero, el

ingeniero debe hallarse familiarizado con los elementos y procedimientos existentes para explorar el subsuelo, con los métodos para analizar y clasificar los resultados de ensayos en el terreno y con las incertidumbres que encierran los resultados que se obtienen con los diferentes métodos de exploración del suelo.

ASPECTOS QUE COMPRENDE UN PROGRAMA DE EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO.

Todo estudio geotécnico debe iniciarse con un reconocimiento detallado del terreno a cargo de personal experimentado. El objetivo de este reconocimiento es contar con antecedentes geotécnicos previos para programar la exploración. Mediante la observación de cortes naturales y/o artificiales producto de la erosión o deslizamiento será posible, definir las principales unidades o estratos de suelos superficiales.

Especial importancia debe darse en esta etapa a la delimitación de zonas en las cuales los suelos presentan características similares y a la identificación de zonas poco recomendables para emplazar construcciones, tales como zonas de deslizamiento activo, laderas rocosas con fracturamiento según planos paralelos a la superficie de los cortes, zonas pantanosas difíciles de drenar, etc. Este reconocimiento se puede efectuar por vía terrestre o por vía aérea dependiendo de la transitividad del terreno.

El programa de exploración que se elija debe tener suficiente flexibilidad para adaptarse a los imprevistos geotécnicos que se presenten. No existen un método de reconocimiento o exploración que sea de uso universal, para todos los tipos de suelos existentes y para todas las estructuras u obras que se estudian.

En todo caso, al programar una exploración se deben considerar las siguientes pautas generales:

1. Ubicar puntos de sondeos a distancias aproximadamente iguales, para luego densificar la exploración si se estima pertinente.
2. Realizar sondeos en aquellos sectores que soportarán rellenos o terraplenes de importancia y aquellos en que la rasante se ubica muy próxima al terreno natural ($h < 0.6$ m).
3. Inspeccionar aquellas zonas en que se tienen cortes de importancia, ubicando los puntos de cambio de cortes a terraplén para conocer el material al nivel de la subrasante.
4. Inspeccionar el subsuelo en aquellos puntos en que se ubican estructuras importantes.

A continuación enumeramos una lista de los diferentes puntos de interés en la preparación de un estudio de suelos, la cual permite considerar los pasos a seguir en su ejecución y elaboración de las diferentes partidas del presupuesto.

General

- Información geológica de la zona
- Información pluviométrica
- Zonificación sísmica

Visita al sitio

- Inspección del sitio de trabajo
- Cercanía de taludes
- Información sobre el drenaje de la zona y sobre el nivel freático
- Situación de cursos de agua
- Disponibilidad de fuentes de agua para la ejecución de las perforaciones
- Dificultades topográficas
- Facilidades de acceso y de fuentes de combustible
- Disponibilidad de ayuda laboral y de talleres mecánicos
- Facilidades de alojamiento del personal de campo
- Información sobre estructuras cercanas y sus características, incluyendo la posibilidad de información del estudio de suelos respectivo
- Inspección del comportamiento y estado actual de esas estructuras

- Observación de síntomas de suelos expansivos

Otros datos necesarios

- Mapas o planos de la zona
- Plano del terreno objeto del estudio

Decisiones por tomar

- Planeamiento de la exploración necesaria en cuanto al tipo, situación y probable profundidad de calicatas, taladros o perforaciones.
- Posible necesidad de la colaboración de un ingeniero geólogo

Trabajos de campo

- Traslados de equipos al sitio de trabajo
- Replanteo y nivelación de los sitios de exploración
- Ejecución de calicatas y/o perforaciones
- Suministro de agua para las perforaciones
- Arreglo del terreno para la instalación del equipo en laderas
- Toma de muestras inalteradas
- Tomas de muestras para ensayos de compactación
- Ejecución de ensayos en sitios estableciendo su tipo y numero de acuerdo con la finalidad del estudio

- Atención a la logística del trabajo (suministro de combustible, de frascos para las muestras, transporte de muestra, etc.)
- Vigilancia nocturna o en días feriado

Trabajos de laboratorio

- Inspección visual y táctil de las muestras
- Humedad de todas las muestras
- Selección de las muestras por ensayar y de los ensayos por ejecutar
- Enumeración de ensayos de rutina y de posibles ensayos especiales
- Tratamiento de muestras imperturbadas
- Ensayos para determinar componentes químicos en suelos y en aguas freáticas

Trabajos de oficina

- Dibujo de ensayos de laboratorio
- Dibujo de planillas con resultados de las perforaciones y de los ensayos de laboratorio
- Consideración de esos resultados y establecimientos de parámetros
- Consideración de la posibilidad de corrección de suelos defectuosos
- Selección de las soluciones apropiadas para excavaciones, muros y fundaciones
- Consideraciones sobre el efecto del nivel de agua subterránea

- Calculo de la capacidad de soporte para fundaciones directas
- Determinación de las características de pilas o pilotes (tipo, diámetro, longitud y cargas de trabajo)
- Estimación de asentamientos en fundaciones
- Calculo de empujes sobre muros de retención

Informe

- Descripción del trabajo de investigación realizado
- Descripción de la exploración realizada
- Resultados de perforaciones y ensayos de laboratorio
- Presentación de las soluciones estudiadas y de sus características respectivas
- Recomendaciones para la ejecución de la obra, incluyendo las especificaciones correspondientes

Al final el producto que obtenemos es el informe escrito, este es el elemento de mayor importancia en un estudio del subsuelo para fundación de una estructura. El informe es el resultado de la exploración, de los ensayos, de los cálculos de capacidades, etc, pero sobre todo es el exponente del criterio usado en la selección de soluciones apropiadas, lo cual es el producto de los conocimientos y experiencia profesional del ingeniero de fundaciones a cargo del trabajo.

El informe requiere; en primer lugar, la presentación de un plano de ubicación del lugar en objeto de estudio y luego de un plano del terreno, con la posición de la estructura y de la exploración llevada a cabo. En el se indicarían las calicatas y/o perforaciones con sus cotas respectivas.

Habría una primera parte en la cual se presentará el objeto del estudio y se hará una descripción de la estructura correspondiente, señalando las características de ella que pudieran ser interesantes, tales como número de pisos, profundidad de sótanos, etc. y especialmente, los valores reales o estimados de las cargas por columnas. Se tratará en esta primera parte de la relación y posibles efectos de estructuras o condiciones particulares existentes en las cercanías del sitio en estudio, incluyendo edificios vecinos, cursos de agua, taludes, etc.

Se hará luego una relación de la exploración efectuada, indicando las razones para justificarla, describiendo los procedimientos para realizarla e incluyendo sus características correspondientes, como serían, en el caso de perforaciones a máquina, el equipo utilizado, el diámetro de los forros, las profundidades, el tipo de muestra, etc.

A continuación se presentarán los resultados, tanto de las perforaciones mismas, como de los ensayos de laboratorio. La presentación de estos resultados se hace en una planilla para cada perforación, en la cual se incluyen

la descripción de los diferentes estratos de suelo encontrados, los valores gráficos y numéricos de la prueba de penetración, el perfil de humedades, los límites de plasticidad, componentes granulométricos, pesos unitarios, valores de compresión sin confinar, etc.

Es conveniente representar los límites en forma de barras horizontales combinadas con el perfil de humedad, lo que permite fácilmente comparar los límites plásticos con las humedades correspondientes. Se acostumbra también representar la granulometría con barras horizontales, indicando los porcentajes de grava, arena y partículas menores al tamiz número doscientos.

Estos ensayos permiten establecer los parámetros correspondientes a cada uno de los estratos analizados. Se puede enumerar los ensayos efectuados sin necesidad de detallarlos, sino en aquellos casos de ensayos especiales no normalizados.

Se expondrá luego, el criterio usado para la selección de la o las soluciones apropiadas para cada una de las diferentes etapas de la obra de que se trate. Estas soluciones comprenden la relativas a excavaciones, muros de retención, rellenos, tipos de fundaciones y procedimientos de corrección de suelos defectuosos, como son los suelos expansivos, colapsibles y licuables.

Las soluciones se describirán tratando de precisarlas y dimensionarlas, exponiendo las condiciones de su aplicación y estableciendo los empujes sobre

muros, las capacidades de las fundaciones y sus características, los procedimientos a seguir en excavaciones, correcciones de suelos y en la ejecución de las obras.

Todas estas soluciones serán el producto de cálculos efectuados sin que sean necesarios detallar esos cálculos. Nuestra costumbre es conservar esos cálculos en nuestro archivo pero sin presentarlos en nuestro informe. Por ejemplo, al indicar la carga de trabajo de un pilote que se propone en el informe, siempre nos limitamos a indicar esa carga de trabajo sin explicar como fue calculado.

El informe debe ser escrito en lenguaje sencillo. Tan simple y directo como sea posible. Hay que evitar que el informe tenga el aspecto de una tesis de grado. Por ejemplo en un ensayo triaxial debe evitarse dar detalle de las presiones laterales utilizadas, de las piedras porosas usadas, etc. Como también en otros casos detallar todo el proceso de cálculo de un empuje de tierra sobre un muro de sótano o presentar todas las formulas utilizadas para calcular la capacidad de carga de un pilote.

La presentación y edición del informe debe ser hecha de forma que se facilite su lectura, separando bien las diferentes partes de que consta, y poniendo énfasis en las recomendaciones finales que a menudo es la única parte que interesa a muchos lectores. Estas recomendaciones deben incluir las

especificaciones para el tratamiento de agua subterránea, para los procedimientos de corrección de suelos defectuosos, para el procedimiento y la secuencia constructiva de la obra y las especificaciones de los diferentes elementos que la constituyen tales como muros, tirantes, fundaciones directas, pilas o pilotes de fundación, etc.

2.6 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS PARA LA CLASIFICACIÓN DE ARCILLAS.

Para clasificar una arcilla, es necesario conocer tanto sus propiedades físicas como químicas. Por el lado de las propiedades físicas tenemos el análisis de los límites de Atterberg (explicados con anterioridad), los cuales nos dan la clasificación del suelo arcilloso por medio del estudio de su plasticidad. Desde el punto de vista de sus propiedades químicas, se hace necesario el conocimiento de su estructura y de su composición mineralógica por medio de métodos que describiremos a continuación:

Muchos de los métodos que describimos a continuación, se basan en el uso de los Rayos "X" que no son más que ondas electromagnéticas con longitudes de onda muy pequeñas, de alrededor de 0.1 a 100×10^{-10} m, imperceptibles al ojo humano. Cuanto menor es su longitud de onda, mayor es su energía y su poder de penetración. Los Rayos "X" son muy utilizados en el estudio y análisis de las estructuras de sustancias cristalinas, debido a que tienen una longitud de onda del mismo orden de magnitud que la separación de los átomos en un cristal. Es por este motivo que el patrón de difracción de Rayos X incidentes sobre un cristal es apreciable y contiene información sobre la estructura de la red. Los Rayos X se producen cuando se bombardea un material con electrones a alta velocidad, los cuales chocan con un blanco sólido y su energía cinética se

transforma en radiación. La longitud de onda de la radiación emitida depende de la energía de los electrones y los rayos emitidos no pueden tener una energía mayor que la energía cinética de los electrones que los producen.

La difracción es la desviación hacia una nueva dirección, de las ondas que encuentran un objeto (un obstáculo) en su camino; sin embargo para que la difracción ocurra el tamaño del objeto debe ser del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de las radiaciones incidentes, esto significa que las ondas tienen que estar en fase, lo que ocurre cuando su diferencia de trayectoria es cero o un múltiplo entero de longitudes de onda.

La difracción tiene lugar siempre que se satisfaga la ley de Bragg, la cual puede representarse por medio de la ecuación:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad \text{Ecuación 2.6.1}$$

Donde:

λ : longitud de onda

d: distancia entre redes cristalinas

θ : ángulo de refracción

Se puede variar por tanto la longitud de onda y el ángulo. Los métodos principales son: el método Laue donde la longitud es variable y el ángulo fijo; método del cristal rotatorio donde la longitud de onda es fija y el ángulo variable en parte y el método del polvo donde la longitud de onda es variable y el ángulo también.

1. *MÉTODO DE LAUE*: El método de Laue fue el primero y reproduce el experimento de Von Laue. Se utiliza un monocristal fijo sobre el cual se hace incidir un haz de Rayos X blancos en dirección perpendicular a la placa fotográfica. El haz directo forma una mancha negra sobre la placa fotográfica, aunque se suele poner una chapa de plomo para interceptarlo y que no forme tal mancha. Cada familia de planos reticulares formará su mancha característica.

El ángulo de incidencia entre el haz de Rayos X y los distintos planos reticulares con su espaciado d es fijo. Pero como se trata de Rayos X blancos, están presentes todas las longitudes de onda. La Ley de Bragg se cumple siempre y cuando $(2d \sin \theta) / n$ esté incluido en el rango de longitudes de onda producidos por el tubo de Rayos X y aparecerán las manchas de difracción correspondientes a cada familia de planos reticulares.

Este método admite dos variantes según la disposición de la fuente, cristal y película, en ambos casos la película es plana y perpendicular al rayo incidente. En el método de transmisión de Laue la película se coloca al final, en el método de retroreflexión de Laue la película está en el medio. En ambos métodos se obtienen un conjunto de puntos en la película que pueden asignarse a una figura geométrica: generalmente elipses e hipérbolas en el caso de la transmisión e hipérbolas en la retroreflexión.

El Método de Laue es útil para estudiar la simetría de los cristales, siempre y cuando el haz incidente sea paralelo a un elemento de simetría. Pero no resulta muy aplicable para la determinación de estructuras cristalinas pues resulta difícil saber los valores de la longitud de onda para los que se produce cada señal de difracción.

2. MÉTODOS DE CRISTAL ROTATORIO: Para ampliar las aplicaciones de la difracción de los Rayos X, Bragg consideró que usando una radiación monocromática la única posibilidad para que se cumpla la condición de difracción para un espaciado determinado, es variar el ángulo. Esto se consigue colocando el cristal en un sistema que gire, de tal manera que para cada valor de que cumpla la condición de difracción se produzca un punto en la película. Con ello se puede saber cuales son los planos reticulares asociados a cada difracción. En el método del cristal rotatorio se coloca un monocristal con uno

de sus ejes perpendicular a un haz monocromático de rayos X. Se Coloca un film cilíndrico alrededor y se gira el cristal alrededor de la dirección elegida, coincidiendo al tiempo los ejes de la película y de rotación del cristal. Mientras el cristal gira, en un determinado momento un juego de planos se hallan en el ángulo de Bragg adecuado para refractar el haz monocromático incidente y en ese momento se forma un haz reflejado. Estos rayos reflejados se localizan en conos imaginarios coincidiendo el eje de estos conos con el eje de rotación. El resultado es que los puntos, al extender la película, caen en líneas horizontales. Puesto que el cristal gira alrededor de un eje solamente el ángulo de Bragg no puede tomar todos los valores entre 0 y 90 grados para cada conjunto de planos. Por tanto no todos los conjuntos pueden producir haces difractados. El empleo más importante de este método y de sus variantes es la determinación de estructuras cristalinas desconocidas: para este propósito es la herramienta más poderosa que se dispone.

3. *MÉTODO DE POLVO*: La difracción de rayos X en muestras de polvo cristalino o muestras policristalinas se puso de manifiesto primeramente en Alemania por P.Debye y P.Scherrer en 1916 y casi al mismo tiempo se desarrolló a través de los estudios de Hull en los Estados Unidos. El descubrimiento del fenómeno de la difracción en este tipo de muestras se convierte rápidamente en una técnica experimental de extendido uso, debido básicamente al amplio campo de aplicación que podemos encontrar para el

estudio de sustancias cristalinas. Hoy día esta técnica constituye una habitual herramienta de trabajo con una extraordinaria utilidad en muy distintas disciplinas científicas y tecnológicas, por el carácter polifacético en lo que se refiere a la gran variedad de información que proporciona.

La identificación de fases cristalinas constituye uno de los campos de aplicación más importantes del método de polvo cristalino.

El registro del espectro difractado puede realizarse empleando dos dispositivos experimentales con características bien diferenciadas:

- Métodos fotográficos (cámaras Debye-Scherrer).
- Difractómetro de polvo.

La diferencia radica en el registro, en las cámaras de polvo el espectro se registra en una película fotográfica, en la que la densidad de ennegrecimiento indica la intensidad de las radiaciones reflejadas. En el difractómetro de polvo, se obtiene un registro gráfico de las señales que las reflexiones originan en detectores electrónicos de radiación.

EL DIFRACTÓMETRO DE POLVO: Éste método es el que se utilizó para éste estudio en particular, con equipo de difracción de Rayos X PHILLIPS 1730 y goniómetro de dos círculos; conteniendo una geometría denominada Bragg-

Brentano en el que, el contador electrónico forma un ángulo variable ($2\theta = 3^\circ$ - 110°) con el haz incidente de rayos X.

Cuando la muestra gira un ángulo θ el contador gira 2θ , este movimiento es el que hace que el difractómetro se denomine “Difractómetro de dos círculos” (figura 2.6.1). En el difractómetro la muestra se sitúa en el centro de eje del goniómetro de precisión, cuya velocidad angular está sincronizada en la relación anterior 2:1 con el detector.

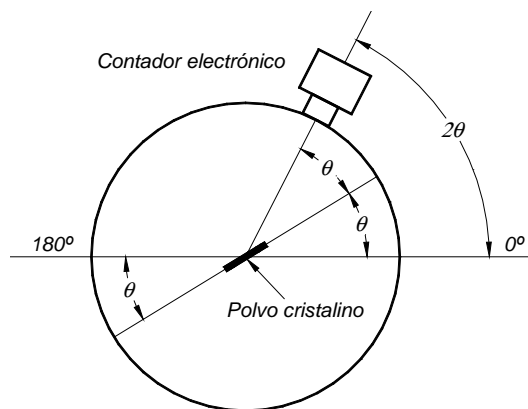


Figura 2.6.1: Diagrama del difractómetro de dos círculos

El registro gráfico o difractograma consiste de picos distribuidos en función de los valores angulares, 2θ , y que corresponden a las de las reflexiones que representan. Las alturas de estos máximos y más concretamente sus áreas constituyen magnitudes muy representativas de las intensidades de las reflexiones correspondientes, las cuales pueden ser medidas con gran exactitud y reproducibilidad.

IDENTIFICACIÓN DE FASES, MÉTODO DE POLVO CRISTALINO

El análisis de los resultados y la identificación de las fases cristalinas en este estudio fue realizado por medio de este método. Éste se basa en el hecho de que cada sustancia en estado cristalino tiene un diagrama de Rayos X que le es característico. Estos diagramas están coleccionados en fichas, libros y bases de datos del *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* y agrupados en índices de compuestos orgánicos, inorgánicos y minerales. Se trata, por lo tanto, de encontrar el mejor ajuste del diagrama problema con uno de los coleccionados.

Un método adecuado es el de “Hanawalt”, en el que cada diagrama aparece caracterizado por los tres picos de difracción más intensos. Contiene un sistema de subgrupos resultante de dividir el rango de los valores de d en 47 regiones, cada una contiene un número aproximadamente igual de diagramas. Cada diagrama con sus tres líneas más fuertes está asignado a un grupo. Todos los diagramas asignados a cada Grupo Hanawalt están ordenados de forma que en la primera columna aparece el valor de d correspondiente a la línea más intensa, en la segunda columna aparece el valor de d correspondiente a la siguiente línea en intensidad y en la tercera columna aparece el valor de d correspondiente a la tercera línea más intensa y en las cinco columnas restantes aparecen los valores de d siguiendo el mismo orden decreciente, tanto en su valor como en el de la intensidad. A continuación de las columnas correspondientes a los valores de d , ordenados según valores decrecientes de

intensidad, aparece la fórmula química, el nombre y el número de la ficha de la sustancia correspondiente.

Al analizar diagramas desconocidos, los pasos a seguir son los siguientes:

- Se ordenan los valores de d en orden decreciente de intensidad.
- Se busca el grupo Hanawalt adecuado en el manual de búsqueda con el valor de d correspondiente a la línea más intensa.
- Se comprueba que la d de la segunda línea más intensa se ajuste con el valor de d de la segunda columna del grupo Hanawalt correspondiente del manual de búsqueda.
- Se toma el valor de d de la tercera línea más intensa del diagrama desconocido y se comprueba si se ajusta con el valor de d la tercera columna Hanawalt del manual de búsqueda.
- Si se ajustan los valores de d del diagrama desconocido con los del grupo de Hanawalt del manual de búsqueda se toma la ficha correspondiente y se acaba de comprobar el ajuste de todos los valores de d del diagrama desconocido con los de la ficha.

- Si las líneas seleccionadas no dan juntas buen ajuste, se eligen otras combinaciones de líneas el diagrama desconocido.
- En el caso de que el diagrama desconocido corresponda a una mezcla de sustancias se sustrae el diagrama encontrado del experimental y se repite de nuevo el proceso (pasos 1 a 6) hasta que todas las líneas significantes del diagrama experimental se ajusten a algún diagrama de las fichas. A la hora de repetir el proceso hay que tener en cuenta que un mismo pico de difracción puede corresponder a más de una sustancia y uno se da cuenta observando las intensidades del pico del diagrama experimental y de la ficha, pues cuando el experimental muestra una intensidad muy superior al de la ficha hay que sospechar que corresponde a más de una sustancia.

Actualmente existen programas informáticos que nos permiten realizar este proceso de manera automática; se cuenta además con las bases de datos JCPDS, lo cual facilita enormemente la identificación de fases cristalinas por el método de polvo.

Existen otros métodos, de los cuales solo hemos mencionado los más comunes y/o los que sirven para caracterizar los minerales arcillosos.

CAPÍTULO III: RECONOCIMIENTO DEL ÁREA EN ESTUDIO Y EXTRACCIÓN DE MUESTRAS ALTERADAS.

3.1 RECONOCIMIENTO DEL ÁREA Y DESCRIPCIÓN DE LOS SITIOS EN ESTUDIO.

3.1.1 Sitio: Guatajiagua

Datos históricos.

Guatajiagua es comunidad auténticamente lenca que, a mediados del siglo XVI, este pueblo aborigen tenía 500 habitantes. En el pasado esta ciudad era llamada Guatoxia y Guatajiao, la cual tiene su propio significado, el cual es: “Lugar del tabaco que proviene de raíces “, “Gua” tabaco “ta” cultivo, “Yagua” valle o lugar.

En 1770, figura como pueblo ajeno de la jurisdicción de Gotera por Ley del 2 de mayo de 1842 se acordó incorporar el pueblo de Guatajiagua, en lo judicial, al distrito de San Miguel separándolo del de Gotera, debido a que la sede del juzgado 10 de instancia de este distrito se había trasladado al pueblo de San Antonio del Sauce.

Desde el 12 de junio de 1842 hasta el 14 de julio de 1875 perteneció al departamento de San Miguel. A partir de esta última fecha ha sido el municipio del Departamento de Morazán (antes de Gotera). Durante la Presidencia del Sr. Pedro José Escalón y con fecha 7 de abril de 1905, la Asamblea Nacional

Legislativa otorgó al pueblo de Guatajiagua el último título de villa; Fue de esta forma como ampliaron el desarrollo hasta que el 13 de agosto de 1928 recibió el título de Ciudad.

Las fiestas patronales las celebran el 29 de enero en honor a San Sebastián y las titulares el 25 de julio en honor a Santiago Apóstol.

Ubicación y Extensión

La ciudad de Guatajiagua, está situada en el Departamento de Morazán en la zona oriental del país con una distancia de 146 kilómetros de San Salvador (ver figura 3.1.1.1).



Esquema de ubicación del pueblo

Figura 3.1.1.1: Esquema de ubicación de sitio Guatajiagua

Guatajiagua está limitada por los siguientes municipios: al norte por Llamaual y ciudad Barrios (departamento de San Miguel); al este por Llamaual; al sur por San Miguel y Chapeltique (ambos del departamento de San Miguel) y al oeste por ciudad Barrios y Chapeltique (ambos del departamento de San Miguel) se encuentra ubicado entre las coordenadas geográficas siguientes: 13° 39'55" LN (extremo septentrional) y 88° 12'29" LWG (extremo occidental).

Su altitud es aproximadamente de 260 metros sobre el nivel del mar, la cual es mayor en los cerros más altos de Guatajiagua, entre los que se pueden mencionar El botijón, La charana, caracoles, El tablón, Las hormigas, El volcán, El cerrón, Las mesas y El cutal. Esto permite un mejor ambiente climatológico en esta ciudad.

Esta importante ciudad, en el Departamento de Morazán, posee una extensión de 70.77 Kilómetros cuadrados, los cuales se dividen de la siguiente forma: El área rural cuenta con 70.06 kilómetros cuadrados aproximadamente y el área urbana con 0.71 kilómetros cuadrados aproximadamente; es aquí donde sus pobladores pueden desarrollar diversas actividades, de las cuales las principales son las actividades artesanales (ver figura 3.1.1.2) y las agrícolas, las cuales favorecen para cubrir diferentes necesidades de la comunidad.



Figura 3.1.1.2: Productos artesanales elaborados con arcilla negra de Güatajiagua

Clima

La mayoría del tiempo el clima es caluroso y pertenece al tipo de tierra caliente.

El monto pluvial anual que se puede alcanzar oscila entre 1800 y 2200 mm.

Vegetación

La flora está constituida por bosques húmedos subtropicales y bosque muy húmedos subtropical. Las especies arbóreas más notables son: madrecaao, nance, morro, cedro, ceiba, copinol, laurel, aceituno, almendro de río, mango, tigüilote Y carbón.

Rocas

Predominan los tipos de lava andesítica y basáltica, riolitas andesíticas y aluviones con intercalaciones de materiales piroclástico.

Suelos

Los tipos de suelo que se encuentran son: Latosoles Arcillo Rojizo y Litosoles.

Alfisoles (Fase pedregosa superficial, de ondulada a montañosa muy accidentadas), Grumosoles. Litosoles y latosoles Arcillo Rojizos y alfisoles.

(Fase a nivel, a fuertemente alomada).

3.1.2 Sitio: San Miguel

San Miguel es el departamento con mayor desarrollo en la zona oriental del país, su reconocimiento como departamento se dio el 12 de Junio de 1,824 por el Jefe de estado Juan Manuel Rodríguez. Se encuentra ubicado a 138 Kilómetros desde la ciudad de San Salvador, unida a ella por la carretera Panamericana, y posee una elevación de 126 msnm; limitando al norte con la república de Honduras, al este con los departamentos de Morazán y La Unión, al oeste con los departamentos de Cabañas y Usulután, al sur encontramos una pequeña franja costera perteneciente al océano Pacífico. Posee 20 municipios los cuales son: Carolina, Chapelrique, Chinameca, Chirilagua, Ciudad Barrios, Comacarán, El Tránsito, Lolotique, Moncagua, Nueva Guadalupe, Nuevo Edén de San Juan, Quelepa, San Antonio, San Gerardo, San Jorge, San Luis de la Reina, San Miguel, San Rafael, Sesori y Uluazapa; destacando entre ellos el municipio de Carolina por sus atractivos géiseres y el municipio de Quelepa por su riqueza arqueológica.

La extensión superficial del departamento es de 2,077.10 Km², con un número de habitantes de aproximadamente 480,000 y crecimiento demográfico anual de 1.09%. También se habla de un parámetro que en la actualidad es de suma importancia, el cual es el saldo migratorio del departamento con un valor de -2.4 miles de habitantes.

Dentro de las actividades del departamento encontramos el cultivo de granos básicos, henequén, caña de azúcar, frutas, tule, mangle, la crianza de ganado

bovino, vacuno, porcino, mular, aves de corral, entre otras. Hablando de manufacturas mencionamos la elaboración de productos alimenticios, hilos, hilazas, bebidas, tejidos de algodón, ropa, artículos de cuero, detergentes, jabones, lácteos y materiales de construcción.

El banco que se tomó para la extracción de muestras fue la facultad multidisciplinaria de oriente, perteneciente a la Universidad de El Salvador.

Originalmente se creó el Centro Universitario de Oriente en el año de 1,969; el cual funcionaba en locales alquilados en la ciudad de San Miguel. En el año de 1,984 el Centro Universitario adquiere un terreno de 108 manzanas, situadas en el Cantón el Jute, jurisdicción de la ciudad de San Miguel; y fue en el año de 1,992 que el Centro Universitario de Oriente pasó a ser la Facultad Multidisciplinaria Oriental.



Figura 3.1.2.1: Departamento de medicina, facultad multidisciplinaria de oriente

3.2 METODOLOGÍA UTILIZADA EN CAMPO PARA LA EXTRACCIÓN DE MUESTRAS.

3.2.1 Sitio: Güatajagua

La zona de la cual se extrajeron las muestras fue la cancha del pueblo (ver plano de ubicación de sondeos), ésta presentaba poca vegetación ya que solo en la periferia se pudieron observar diferentes clases de árboles típicos de la zona, pero en su mayoría la zona estaba cubierta de pasto, como muestra la figura 3.2.1.1.



Figura 3.2.1.1 Área de estudio con escasa vegetación y una superficie bastante regular

Dicha zona contaba con una topografía bastante plana con la excepción de pequeños montículos de suelo, los cuales no sobrepasaban los tres metros de

desnivel con respecto al nivel inferior. Al realizar las perforaciones nos encontramos que en la superficie el suelo era bastante duro, por lo que primero se procedió a remover un poco del suelo superficial, con esto también se lograron obtener muestras que presentaran la menor cantidad posible de material orgánico (ver figura 3.2.1.2), y después con la ayuda de una barra con punta y pala duplex se extrajeron las muestras, almacenándolas en sacos de azúcar para traerlas a laboratorio.



Figura 3.2.1.2 Extracción de pequeña capa de suelo como una preparación previa al sondeo

En algunos de los sondeos a medida se profundizo con las perforaciones se encontró que el material arcillosos solo contaba con un espesor de un metro aproximadamente, lo cual se logro verificar en los cortes de suelo que se originaron por el paso de una pequeña quebrada cercana al banco en estudio (ver figura 3.2.1.3).



Figura 3.2.1.3 Corte en la superficie del terreno debido al paso del agua de una quebrada

Algo bastante característico de la zona es que se encontraron arcillas de diferentes colores, ya que una presenta color rojizo y la otra es de color oscuro, lo cual se muestra en la figura 3.2.1.4.

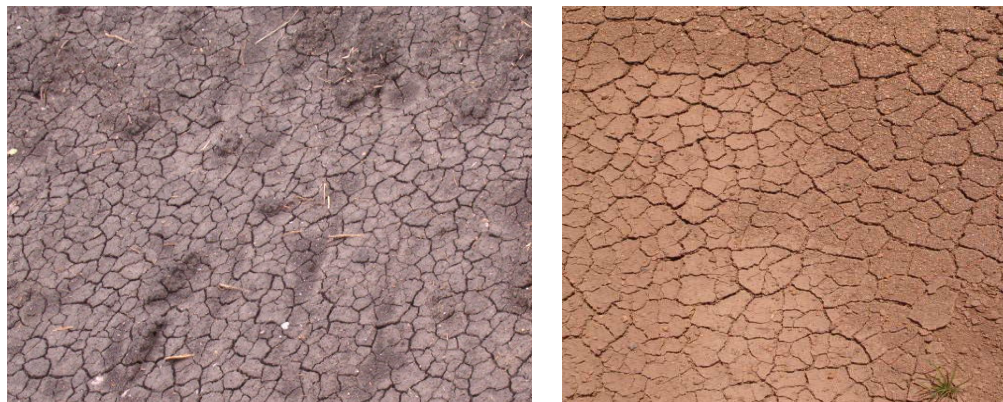
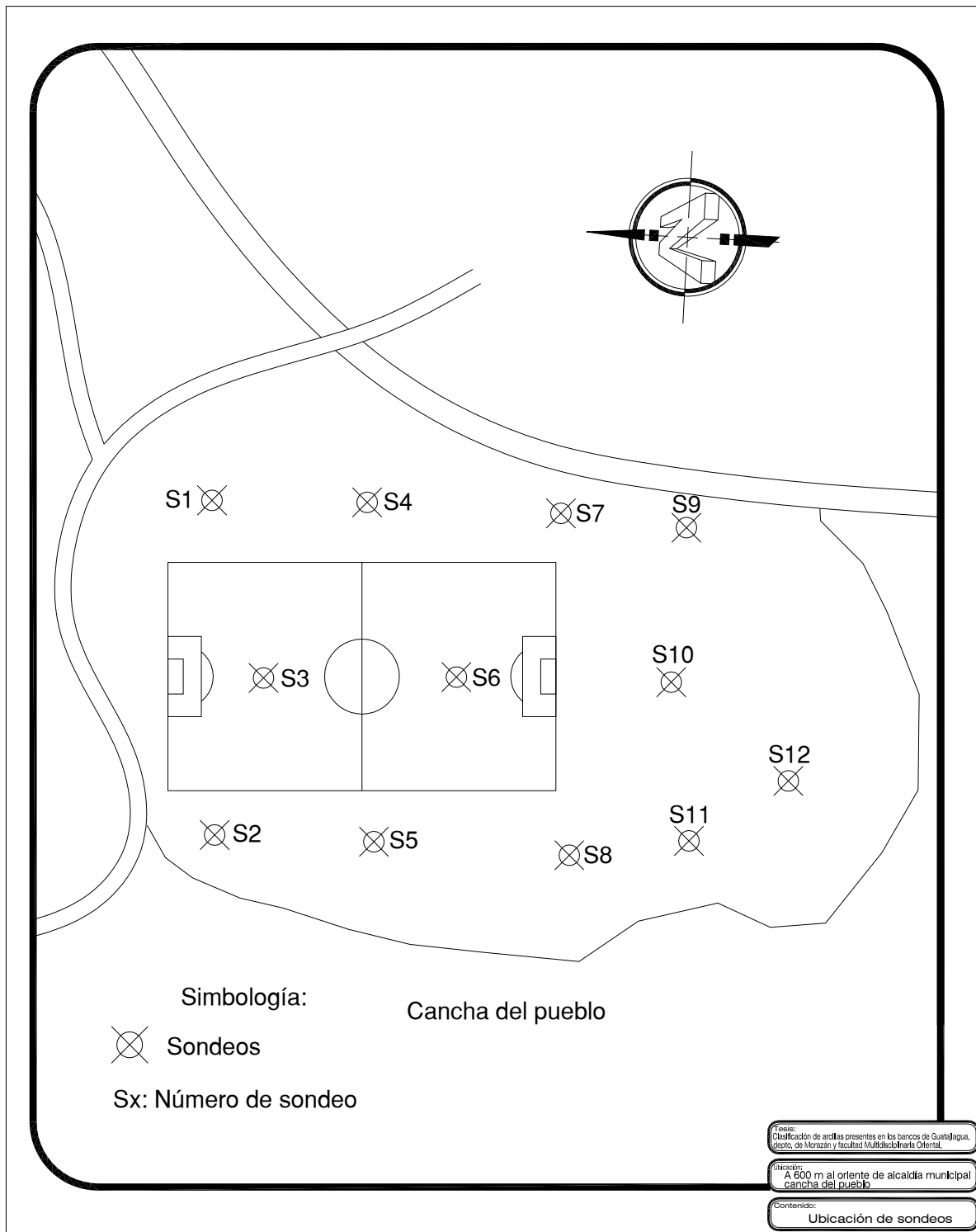


Figura 3.2.1.4 Tipos de arcillas encontrados en Güatajiagua



3.2.2 Sitio: San Miguel.

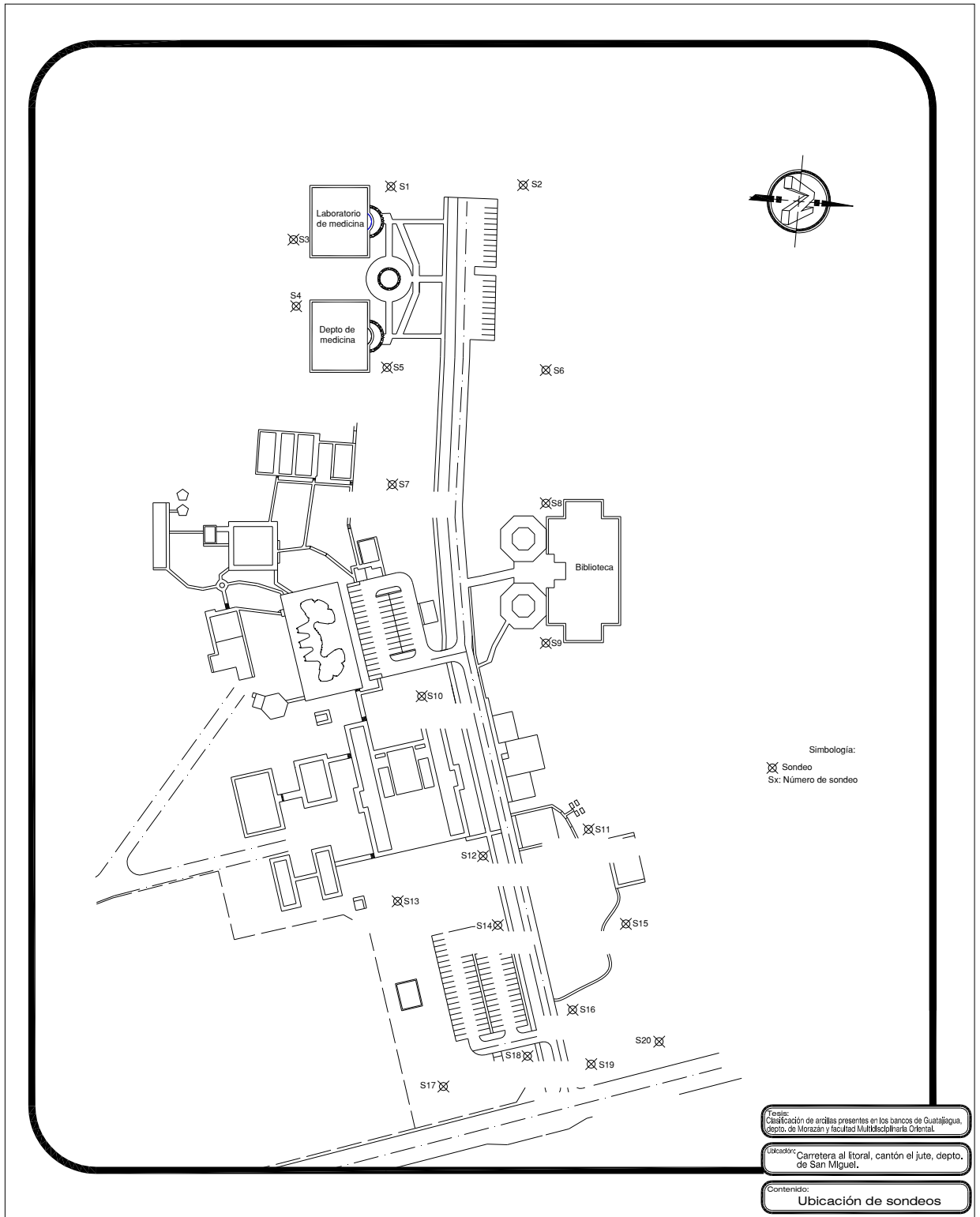
Para realizar la toma de muestras alteradas en la facultad multidisciplinaria de oriente, partimos con el criterio de estudiar solamente el área “urbanizable” ó el área donde existen edificaciones; nos pusimos de acuerdo con nuestros asesores y llegamos a la conclusión de realizar 20 sondeos (ver plano de ubicación de sondeos).

Las muestras se tomaron en pozos abiertos con una pala duplex, excavando a una profundidad de aproximadamente 1.50 m de profundidad; primero se limpió la zona con la ayuda de una piocha y una pala (ver figura 3.2.2.1), para que después nos profundizáramos con la pala duplex. Es de mencionar que el suelo presentaba mucha humedad, mostrando la arcilla una alta pegajosidad.



Figura 3.2.2.1: Limpieza preliminar con piocha y toma de muestra con pala duplex.

Las muestras tomadas fueron almacenadas en sacos de azúcar para llevarlas a laboratorio.



CAPÍTULO IV: ENSAYOS DE LABORATORIOS EN LAS ARCILLAS.

Para conocer de fondo las arcillas en estudio, se hace necesario someterlas a diferentes pruebas de laboratorio; mientras más ensayos se realicen, mayor será el conocimiento que obtendremos. Pero como se ha dicho anteriormente, realizar muchos ensayos puede resultar innecesario por el tiempo y el dinero invertido. Es por esto que para la clasificación de las arcillas en los bancos de San Miguel y Guatajiagua, se propuso realizar únicamente dos ensayos, el primero consistió en la Difracción de Rayos "X" con el fin de obtener los minerales que forman dichas arcillas y los Límites de Consistencia para poder clasificar las arcillas por medio de la carta de plasticidad.

Con el fin de obtener resultados que sean bastantes representativos se realizaron diferentes sondeos en cada uno de los bancos antedichos, efectuando 20 sondeos en el banco de San Miguel y 12 sondeos en él de Guatajiagua, obteniéndose un total de 32 muestras. Cabe mencionar que las muestras fueron del tipo alteradas debido a las pruebas que se llevaron a cabo. La parte anterior podemos llamarla la parte "fácil" del trabajo, una vez nos despedimos de nuestras respectivas familias comenzamos con la parte más larga, tediosa y algunas veces agotante de nuestro trabajo y fue, por supuesto, el trabajo de laboratorio, ya que a cada una de las muestras les realizamos 45 ensayos de cada uno de los límites de Atterberg, es decir, que por cada muestra se hicieron 45 ensayos del límite líquido, 45 del límite plástico y 45 del

límite de contracción. Por otro lado, cada muestra fue analizada dos veces a través de la prueba de Difracción de Rayos “X”, el primer análisis fue realizado con la muestra secada al aire y el segundo se llevo a cabo con la muestra glicolada.

A continuación proporcionaremos una descripción breve del equipo utilizado, así como también del procedimiento que hay que seguir en el laboratorio para el desarrollo del ensayo.

4.1 Prueba de difracción de rayos “X”

4.1.1 Descripción del equipo

Para realizar el ensayo de difracción de Rayos “X”, tuvimos el apoyo del centro de investigación y análisis nuclear de la universidad de El Salvador (CIAN), quienes nos facilitaron el uso del difractómetro de rayos “X” PHILLIPS 1730/00.

El difractómetro está compuesto por diversos elementos, de los cuales solo mencionaremos los que consideramos más importantes a la hora de operar el equipo, enumerándolos a continuación:

1. El generador de potencial constante PW1730/00
2. Sistema de enfriamiento de agua

- | | |
|---|-----------|
| 3. La torre del tubo para difracción de los rayos “X” | PW1316/91 |
| 4. Goniómetro Horizontal | PW1380 |

4.1.1.1 Generador de potencial constante PW1730/00

La unidad PW1730/00 es un generador de potencial constante, cuya función específica, es la de crear las condiciones óptimas de operación, generando alto voltaje, para un tubo de rayos x en sistemas de difracción de rayos x (ver figura 4.1.1.1.1). El diseño cumple con los requerimientos de la Comisión Internacional de Electrónica (IEC, por sus siglas en inglés), en su publicación 348.

Las dimensiones físicas son 1.15 m de alto, 1.08 m de ancho y 0.84 m de profundidad; su peso es de 540 Kg (con todos los módulos complementarios), transmitiendo un esfuerzo al piso de 120 N/m^2 .

El tanque de alto voltaje y el tubo de rayos x son enfriados por un sistema de tuberías en su parte posterior con agua (ver sección 4.1.1.2), a una razón de flujo de 4 l/min, presión mínima de 3 kg/cm^2 y máxima de 5 kg/cm^2 .

Entre sus especificaciones eléctricas podemos mencionar que tiene una potencia de salida de 0.2 a 3 kW, voltaje de salida 20 a 60 kV (en pasos de 5kV), corriente de salida 10 a 80 mA y corriente de ajuste de 0 a 5 mA.



Figura 4.1.1.1.1 Generador de potencial constante PW1730/00

Para operar el generador tenemos el control frontal mostrado en la figura 4.1.1.1.2:

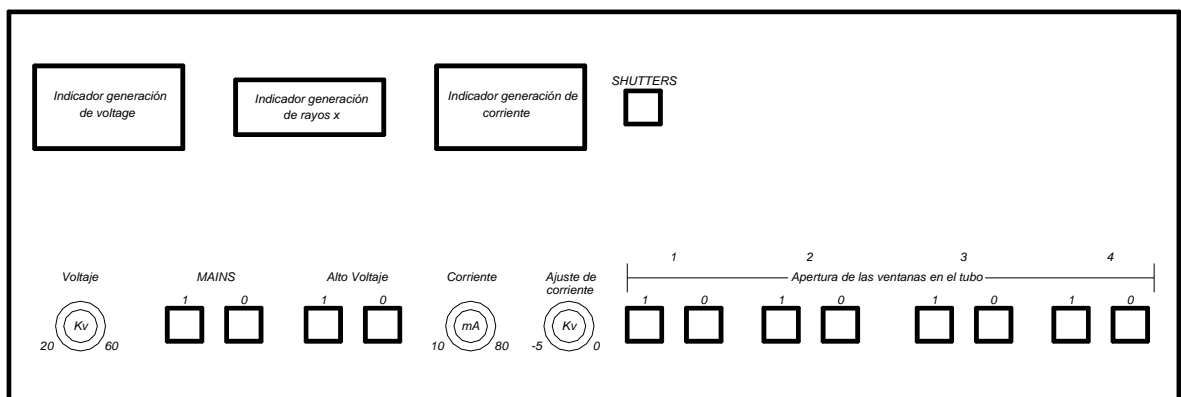


Figura 4.1.1.1.2: Panel de control frontal del generador de potencial constante

PW1730/00.

Descripción de elementos en la parte superior:

- Indicador de Generación de Voltaje: pantalla en donde se registran las medidas de los kV aplicados al tubo de rayos x.
- Indicador de Generación de rayos x: luz de alerta debido a la producción de rayos x.
- Indicador de Generación de Corriente: pantalla en donde se registran las medidas de la corriente en el tubo de rayos x.
- Botón SHUTTERS: nos sirve para abrir las ventanas en el tubo (trabaja en conjunto con los botones de cada ventana)

Descripción de botones y perillas en la parte inferior:

- Perilla de Voltaje: selecciona el alto voltaje desde 20 kV hasta 60 kV en pasos de 5 kV.
- Botones de MAIN: es por medio de este botón que ponemos en operación el equipo (botón 1 de la figura 4.1.1.1.2) e igualmente lo detenemos (botón 0 de la figura 4.1.1.1.2).
- Botones de Alto Voltaje: por medio de ellos se comienza a generar alto voltaje (botón 1 de la figura 4.1.1.1.2) y con el botón 0 de la figura 4.1.1.1.2 damos por finalizada la generación del alto voltaje.

- Perilla de Corriente: con ella seleccionamos la corriente con la que se trabajará en el tubo de rayos x.
- Perilla de Ajuste de Corriente: como su nombre lo indica, sirve para ajustar la corriente en el tubo en un rango de 0 a -5 mA.
- Botones de Apertura de Ventanas en el Tubo: estos botones trabajan en conjunto con el botón de la parte superior “Shutters”, para abrir y cerrar las ventanas en el tubo de rayos x. Son cuatro ventanas que tenemos disponibles, para abrir una de ellas se oprime el botón 1 y para cerrarla el botón 0 de la figura 4.1.1.1.2.

4.1.1.2 Sistema de enfriamiento de agua

Este sistema es el encargado de dispersar el calor producido por el bombardeo de electrones al ánodo y en el tanque de alto voltaje, para mantener una temperatura normal de funcionamiento del equipo (ver figura 4.1.1.2.1).

Las conexiones están situadas en la parte posterior, dentro de las cuales mencionamos a continuación:

- Dos entradas principales de agua.
- Dos salidas de agua para el drenaje.
- Una válvula manual para controlar el caudal.

- Una electroválvula que deja circular el caudal sólo cuando se está generando alto voltaje.
- Un sensor de caudal.



Figura 4.1.1.2.1: Equipo encargado de suministrar agua al sistema de enfriamiento del PW1730/00.

4.1.1.3 La torre de tubo para difracción de los rayos x PW1316/91

La torre de tubo PW1316/91 es el espacio físico donde colocamos el tubo de rayos x, se encuentra fabricado con materiales que dan un blindaje a la radiación x. Posee todos los medios de conexión necesarios para la aplicación de la alta tensión proveniente del generador y las entradas para el circuito de enfriamiento. La salida de los rayos x se logra a través de cuatro ventanas que se encuentran cerradas por medio de discos móviles llamados “SHUTTERS”, que son controlados desde el panel de control de la unidad PW1730/00. Entre

los Shutters y la ventana de salida de los rayos x, se encuentra un segundo disco rotativo controlado manualmente, que puede contener cualquiera de los siguientes filtros: vanadio, manganeso, hierro, níquel, ó circonio. El filtro utilizado en este estudio fue níquel debido al filamento usado para el ánodo de cobre.

4.1.1.4 Goniómetro Horizontal PW1380

Un goniómetro es un instrumento de medición con forma de semicírculo o círculo graduado en grados utilizado para medir ángulos. La unidad PW1380 es un goniómetro con un barrido angular que va de $\theta=360^\circ$ y $2\theta= -65^\circ$ a $+165^\circ$ (ver figura 4.1.1.4.1). En este instrumento el sostenedor de la muestra rota a una velocidad θ y el detector a una velocidad 2θ , ambos rotan sobre el mismo eje, en la misma dirección y una relación de velocidades de 1:2, como es requerido para que se de la reflexión según Bragg. La velocidad de exploración puede ser seleccionada mediante un conjunto de engranajes accesibles por el usuario del goniómetro ($1/8^\circ$, $1/4^\circ$, $1/2^\circ$, 1° , 2° de 20 por minuto).



Figura 4.1.1.4.1: Goniómetro horizontal PW1380.

En las figuras 4.1.1.4.2 se muestra el principio de operación del goniómetro, en esta se aprecia que un haz divergente de rayos x proveniente de un punto focal, pasando a través del sistema de ranuras divergentes G y B inciden sobre la superficie de un espécimen plano C. Todos los rayos difractados en el ángulo θ , debidamente orientados por la estructura cristalina bajo estudio, convergerán aproximadamente en una sola línea donde la rejilla D ha sido ubicada, en serie se colocan una rejilla receptora y una rejilla de dispersión, donde esta última oriente la emisión hacia el detector proporcional.

La ranura receptora es colocada sobre el círculo H con centro en P con el fin de explorar el ángulo 2θ , la muestra es rotada alrededor de P también, de forma que se mantenga tangencial al círculo K formado por L, P y D. El sistema de ranuras paralelas asegura un intervalo estrecho de líneas difractadas.

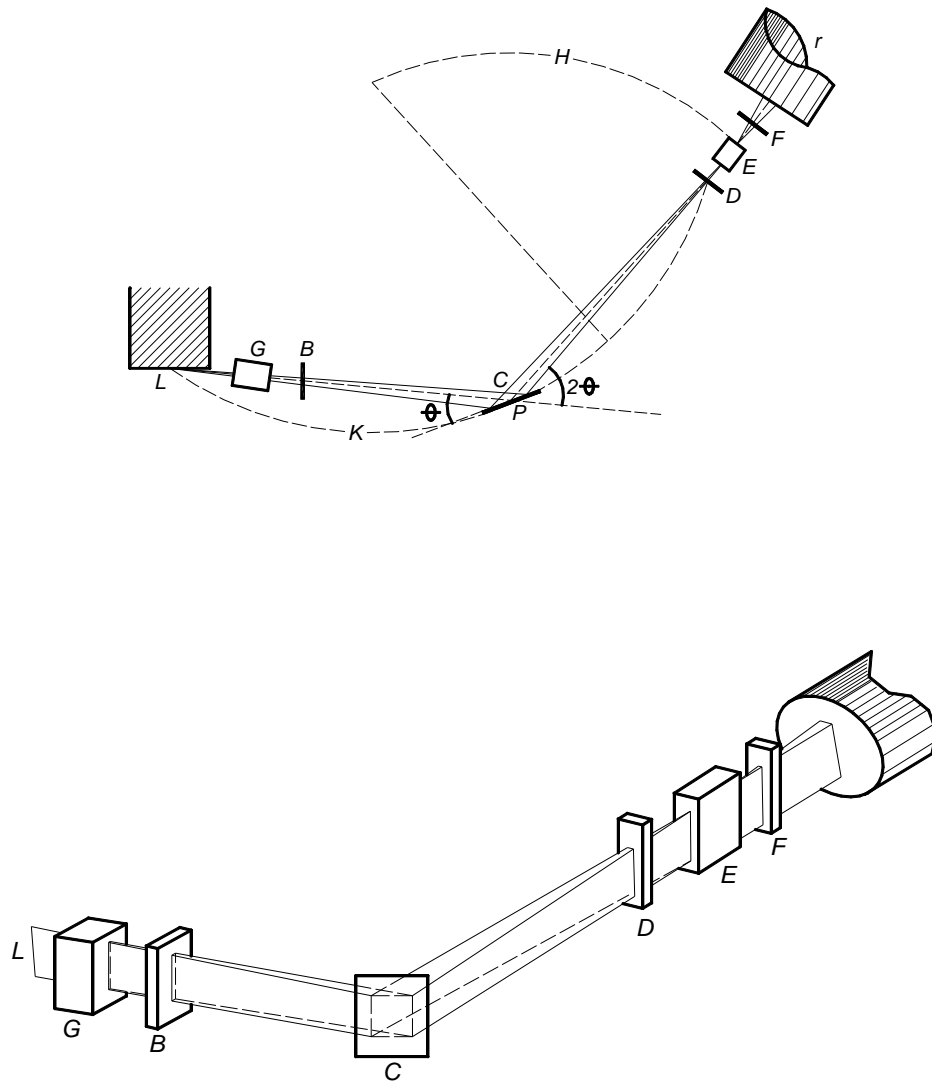


Figura 4.1.1.4.2: Esquema de la geometría unidad PW1380.

4.1.2 Procedimiento para realizar el ensayo

A continuación describimos el procedimiento que se siguió para realizar la prueba de laboratorio de difracción de Rayos X:

a-) Selección de la muestra:

La muestra en estudio debía ser representativa del banco, para esto fue necesario un proceso de cuarteo que se describe a continuación:

- Tomamos una porción de muestra tamizándola por medio de la malla N°40 (tamaño de la abertura 0.425 mm), lo que pasó dicha malla fue homogenizada, dividiéndola después en cuatro porciones iguales.
- De la muestra anterior se tomaron dos porciones opuestas.
- Se unen las dos porciones y se volvieron a homogenizar, separándolas en cuatro partes iguales.
- Se tomaron dos partes opuestas, siendo éstas las que se sometieron a la prueba de laboratorio.
- Se colocaron en un recipiente de plástico debidamente identificado con el nombre del propietario (TMG: tesis Mena Garay), el número de muestra (1) y el nombre del banco de donde fue tomada (ver figura 4.1.2.1).



Figura 4.1.2.1: Muestras para ser utilizadas en el ensayo de difracción de Rayos “X”.

b-) Preparación de la muestra:

En el método del polvo, el tamaño de las partículas es de gran importancia, por lo que se debió pulverizar la muestra para llegar a un tamaño de grano de 5 – 10 μm , por medio de los siguientes pasos:

- Se tomó la muestra y se pulverizó con un mortero de ágata (ver figura 4.1.2.2)



Figura 4.1.2.2: Mortero de ágata para pulverizar muestras.

- Tamizamos la muestra pulverizada (ver figura 4.1.2.3)



Figura 4.1.2.3: Tamizado de muestras pulverizadas.

- Colocamos parte de la muestra tamizada en un porta objetos de vidrio de 3x2 cm debidamente identificado, y se agregó una gota de agua con la ayuda de una piseta, para dispersar la muestra por medio del

borde de otro vidrio tratando de esparcirla de manera uniforme y homogénea (ver figura 4.1.2.4).



Figura 4.1.2.4: Dispersión de la muestra en el porta objeto de vidrio.

- Se dejó secar al aire la muestra por 24 horas (ver figura 4.1.2.5).

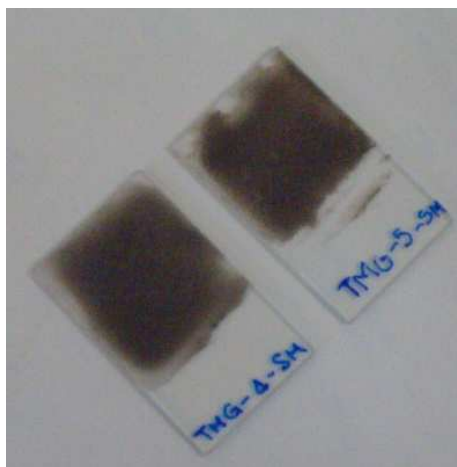


Figura 4.1.2.5: Muestras secadas al aire.

c-) Operación del difractómetro PHILLIPS PW-1730:

Para operar el equipo es necesario tener un buen conocimiento de su funcionamiento ya que por la generación de los rayos x, es extremadamente peligroso. Los pasos que se siguieron para obtener el difractograma, se resumen a continuación:

1-) Encendimos el equipo generador de potencial constante PHILLIPS PW-1730 por medio del botón número 1 del MAIN (ver figura 4.1.2.6); dejando un tiempo de 10 minutos para su estabilización.

2-) Activamos la fuente de alimentación del goniómetro.

3-) Encendimos la computadora e iniciamos el programa LABVIEW/FÉNIX v 2.0.

4-) Pusimos en marcha el sistema de enfriamiento.

5-) Encendimos el alto voltaje con el botón número 1 (ver figura 4.1.2.6), esperando durante 5 minutos para alcanzar la estabilización del equipo.

6-) Realizamos incrementos tanto de voltaje como de corriente, teniendo el cuidado de mantener siempre la condición $Kv > mA$ (ver figura 4.1.2.6).

7-) Colocamos la muestra en el eje del goniómetro.

8-) Determinamos el ángulo de inicio en el goniómetro, colocando la palanca del motor en posición de “embrague”, giramos la manivela hasta alcanzar la posición del ángulo deseada y regresamos la palanca a la posición de desembrague.

9-) Abrimos la ventana del tubo de rayos x, presionando simultáneamente el botón “SHUTTERS” con el número 1 de la ventana 4 (ver figura 4.1.2.6).

10-) En estos momentos se debe de ingresar los datos a la computadora los cuales fueron:

- Nombre del archivo
- Comentarios
- Ángulo de inicio

11-) Iniciamos la corrida de la muestra.

12-) Por último se guardó el archivo que contiene el difractograma.

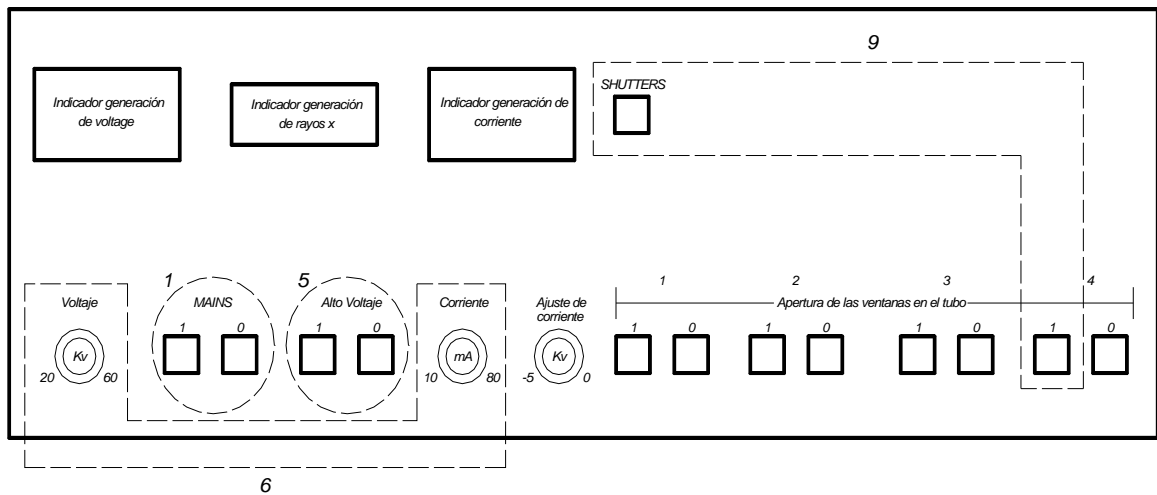


Figura 4.1.2.6: Tablero de control frontal equipo de difracción de rayos x PHILLIPS PW-1730.

4.1.3 Presentación de los resultados

Al final de la prueba los resultados son presentados en una gráfica intensidad vrs ángulo 2θ (ver figura 4.1.3.1), llamada difractograma, el cual puede ser considerado como la “huella digital” de los minerales; por lo que podemos identificar con este el tipo de mineral.

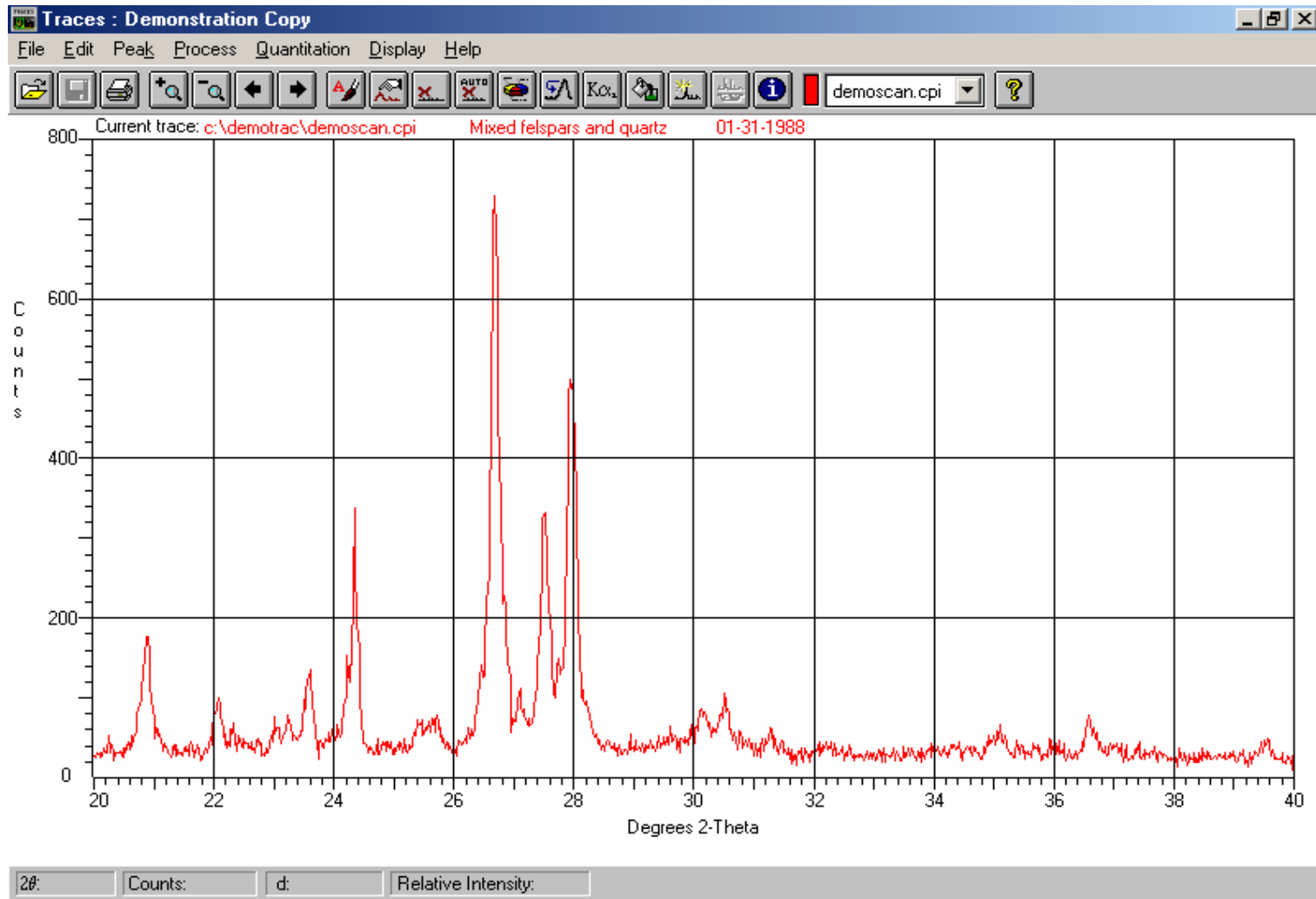


Figura 4.1.3.1: Difractograma considerado la huella digital de los minerales.

4.2 Estados de consistencia de los suelos: Ensayo de límites de plasticidad o límites de Atterberg (A.S.T.M. D 4318-00)

4.2.1 Limite Líquido

4.2.1.1 Alcance de la Prueba

- Este método de ensayo cubre la determinación del límite líquido, presentando tanto sus procedimientos como el equipo necesario para llevar a cabo la prueba.
- El límite líquido y plástico de los suelos (Junto con el límite de contracción) esta muchas veces referido colectivamente como los límites de Atterberg. Estos son límites fronteras de los diferentes estados de consistencia de los suelos plásticos.
- El límite líquido de muchos suelos que han sido secados antes de la prueba pueden ser considerablemente diferentes de los valores obtenidos en las muestras no secadas. Si los límites líquidos de los suelos son usados para correlacionar o estimar el comportamiento ingenieril de los suelos en su estado de humedad natural; no se debe permitir el secado de las muestras antes de probarlas a menos que la información sobre las muestras secas sean específicamente las deseadas.
- Los procedimientos que se describen a continuación son ejecutados solo en la porción de suelo que pasa la malla No 40 (425 μ m). Por consiguiente la contribución relativa de esta porción de suelo a las propiedades de la

muestra debe ser considerada como un todo cuando se usen estas pruebas para evaluar las propiedades de un suelo.

4.2.1.2 Descripción del equipo

Para la realización de esta prueba es necesario el siguiente equipo:

Copa de Casagrande:

La Copa de Casagrande consiste en una taza semiesférica de cobre que se halla acoplada a una base de goma endurecida. El dispositivo se encuentra descrito por la norma ASTM D 423, definiendo el volumen de la copa y el módulo de elasticidad de la base de goma endurecida (ver figura 4.2.1.2.1). Este equipo posee una manivela que, al accionarla, producirá caídas sucesivas de la semiesfera sobre la base desde una altura específica de un centímetro. La velocidad con que se accione la manivela determinará en número de golpes por unidad de tiempo que sufrirá la copa.



Figura 4.2.1.2.1: Copa de Casagrande

Acanalador ó Ranurador:

Éste dispositivo en particular tiene dos tipos, el primero es el acanalador de Casagrande y el segundo el acanalador ASTM. Ambos son muy diferentes entre si, y su uso dependerá del tipo de suelo en estudio, así para suelos poco plásticos es recomendable el uso del acanalador ASTM y para suelos muy plásticos el acanalador de Casagrande (para mayor información referirse a sección 2.3). Estos ranuradores son utilizados para realizar una pequeña ranura en la muestra de suelo contenida en la copa (ver figura 4.2.1.2.2).



Figura 4.2.1.2.2: Elaboración de ranura en muestra de suelo.

Balanza:

Con una precisión de 0.01 gramos, para determinar el peso de la muestra en sus estados húmedo y seco (ver figura 4.2.1.2.3).

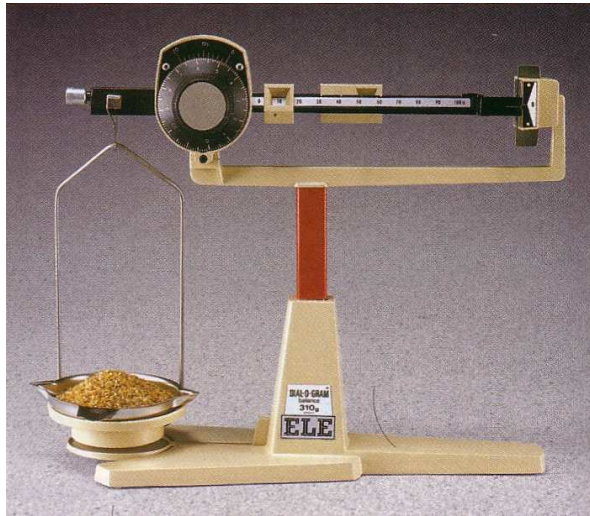


Figura 4.2.1.2.3: Balanza mecánica de precisión

Cápsulas de porcelana:

De aproximadamente 60 mm de diámetro y 30 mm de altura, con su borde superior pulido y esencialmente paralela a la base, para dejar la muestra en saturación por lo menos 24 horas. (ver figura 4.2.1.2.4)



Figura 4.2.1.2.4: Cápsula de porcelana para preparación de muestra

Espátula:

Con una hoja flexible de aproximadamente 75 mm de largo por 20 mm de ancho, para poder moldear la muestra (ver figura 4.2.1.2.5).



Figura 4.2.1.2.5: Espátula para moldear la muestra

Piseta:

Puede usarse un contenedor similar para agregar cantidades controladas de agua al suelo y aumentar su contenido de humedad, además se puede utilizar para lavar los finos de las partículas gruesas (ver figura 4.2.1.2.6).



Figura 4.2.1.2.6: Piseta para agregar agua a la muestra en estudio

Platillos de vidrio:

Con un diámetro que puede variar entre 5 y 8 centímetros aproximadamente, (aunque sus dimensiones no se encuentran normadas), para colocar las muestras húmedas en el horno; deberán estar debidamente identificados, ya sea con un código propio del laboratorio o de la persona encargada de realizar la prueba, esto se hace para lograr distinguirlos del resto de platillos y de esta forma lograr un mejor control del ensayo y sus variables.

Mortero de ágata y pistilo:

El mortero es de forma similar a las capsulas de porcelana y tiene un peso aproximado de 6 libras (2.7 Kg) y pueden tener diferentes capacidades, las cuales varían de acuerdo a su tamaño. Este es utilizado para la preparación de

la muestra, la cual es pulverizada con el pistilo dentro del mortero para disminuir los tamaños de sus granos y de esta forma facilitar que los granos finos se separen de los más grandes y puedan ser tamizados de una manera más efectiva y rápida (ver figura 4.2.1.2.7).



Figura 4.2.1.2.7: Mortero de Ágata y Pistilo

Franelas:

Para limpieza del área de trabajo así como de los instrumentos.

Tamiz N° 40:

Fabricado con alambres de bronce o de acero inoxidable, tejidos en forma de cuadrícula, con una abertura nominal de 0.425 mm. El tejido deberá estar sostenido mediante un bastidor circular metálico, de lámina de bronce o latón, de 206 ± 2 mm de diámetro interior y 68 ± 2 mm de altura, sujetando la malla rígida y firmemente a una distancia de 50 mm del borde superior del bastidor (ver figura 4.2.1.2.8).



Figura 4.2.1.2.8: Tamices N° 40 estándar

Horno para secado:

Con circulación de aire, temperatura regulable y capaz de mantener continuamente una temperatura de 110 ± 5 °C (230 ± 9 °F) a través de la cámara de secado (ver figura 4.2.1.2.9).

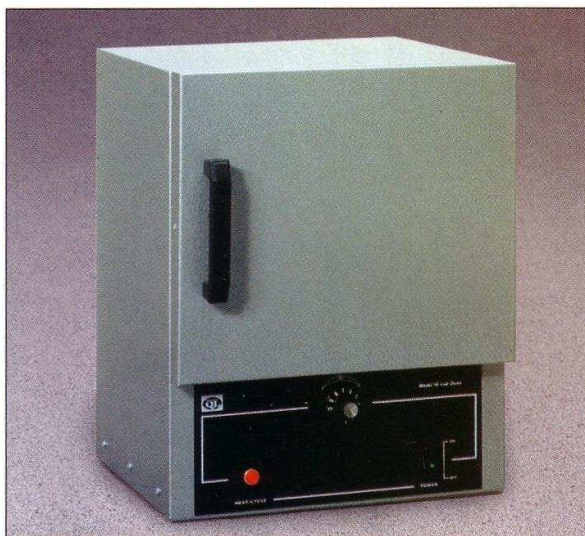


Figura 4.2.1.2.9: Horno de secado para laboratorio

Termómetro:

El cual es utilizado para verificar y controlar que la temperatura del horno sea la adecuada durante todo el proceso de secado de muestras (ver figura 4.2.1.2.10).

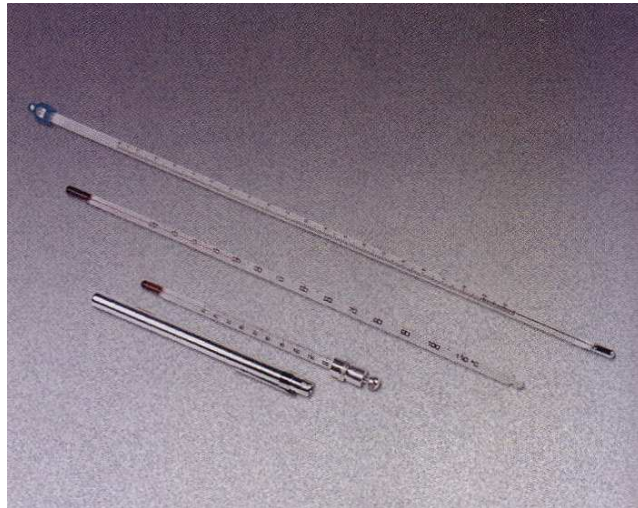


Figura 4.2.1.2.10: Termómetros de vidrio para laboratorio

4.2.1.3 Procedimiento para realizar el ensayo.

Determinación del límite líquido.

Para realizar la prueba se utilizó el método de los tres puntos o multipunto, el cual consiste en la obtención de tres diferentes contenidos de humedad para un mismo suelo y sus respectivos números de golpes en la copa de Casagrande, para que posteriormente estos resultados se grafiquen en papel

semilogarítmico, y obtener la curva de fluidez a partir de la cual se determinara el límite líquido para 25 golpes (ver figura 4.2.1.4.1).

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

Preparación de la muestra

Cabe mencionar que el procedimiento a seguir para la preparación de la muestra será el mismo, independientemente que método se este utilizando, ya sea el método multipunto o el método de un solo punto, lo único que difiere de ambos métodos es la consistencia que la muestra, ya preparada, debe poseer antes de efectuar el ensayo, teniéndose así, que para el método multipunto la consistencia de la muestra deberá ser tal que el número de golpes necesarios para cerrar la ranura esté entre 25 y 35, pero si el método a utilizar es el de un solo punto, el número de golpes necesarios deberá estar entre los 20 y 30 golpes.

Preparación húmeda

Muestras que pasan el tamiz N° 40

Cuando por análisis visual y manual se determina que la muestra presenta muy poca o ninguna cantidad de material que es retenido en el tamiz N° 40 se deberá seguir el siguiente procedimiento:

- Mezclar la muestra hasta que presente una consistencia que aproximadamente se encuentre dentro del rango de 25 a 35 golpes necesarios para cerrar la ranura (ver figura 4.2.1.3.1).



Figura 4.2.1.3.1: Amasado de la muestra

- Si durante el mezclado se encuentran pequeños porcentajes de partículas que serían retenidas en el tamiz N° 40, se pueden remover a mano. En caso de que las partículas correspondan a material cementado u otro tipo de partícula frágil no se tratarán de demolerlas sino se deberá separarlas a mano o lavando la muestra.
- Seleccionar la muestra que garantice de 150 a 200 g de material que pase el tamiz N° 40.
- Guardar la muestra en un recipiente que evite la pérdida de humedad y dejarla reposando al menos 16 horas con el objetivo de que posea una humedad homogénea (ver figura 4.2.1.3.2). Para iniciar el ensayo se deberá volver a mezclar la muestra de suelo. El tiempo empleado para mezclar adecuadamente un suelo variará grandemente dependiendo de la

plasticidad y el contenido de humedad inicial. Periodos iniciales de mezclado de más de 30 minutos pueden ser necesarios para las arcillas grasas y endurecidas.



Figura 4.2.1.3.2: Cápsula de porcelana en bolsa plástica para evitar pérdida de humedad

Muestras que contiene material retenido en el tamiz N° 40

- Colocar la muestra en un recipiente y cubrirlo con agua. Permitir que la muestra se sature hasta que todos los terrones sean disueltos.
- Apoyar el tamiz N° 40 en la parte inferior de un recipiente limpio. Enjuagar la mezcla de agua y suelo dentro del tamiz.
- Después de retirar los materiales gruesos en la medida de lo posible, cubrir el tamiz con agua hasta 13 mm por encima de la superficie.
- Agitar la mezcla con los dedos mientras el tamiz se va subiendo y bajando dentro del recipiente y remover la suspensión para que los materiales finos

sean lavados de los gruesos. Romper los terrones frotándolos suavemente sobre el tamiz con la punta de los dedos. Para terminar, levantar el tamiz por arriba de la superficie del agua y enjuagar el material retenido con agua.

- Desechar el material que aún permanece por encima del tamiz N° 40.
- Reducir el contenido de humedad de la muestra que paso a través del tamiz hasta aproximarse al límite líquido, de acuerdo a alguno o a una combinación de los siguientes métodos:
 - a) Exponer la muestra a corrientes de aire a la temperatura de un cuarto.
 - b) Exponer la muestra a corrientes de aire caliente de una fuente semejante a una secadora de pelo
 - c) Filtrando en un embudo Buchner o usando candelas de filtro, o
 - d) Drenando en un colador o en un plato de mortero de Paris o papel filtro con alta resistencia a la humedad.

Si el plato de mortero de Paris es usado, tenga cuidado que el plato nunca llegue a estar suficientemente saturado, séquelo vigorosamente entre cada uso.

- Guardar la muestra en un recipiente que evite la pérdida de humedad y dejarla reposando al menos 16 horas. Para iniciar el ensayo se deberá volver a mezclar la muestra de suelo.

Preparación seca (método utilizado en este trabajo de investigación)

- Seleccionar una muestra del suelo y dejar secar al aire o en un horno a una temperatura que no exceda los 60 °C, hasta que los terrones de suelo se puedan pulverizar fácilmente.
- Cuando la muestra se encuentre seca, esta debe ser pulverizada en el mortero con un pistilo, con el cuidado de no romper los granos individuales. Cuando se encuentren presentes partículas gruesas o desmenuzables durante la pulverización del material, estas no deben quebrarse para que pasen por el tamiz N° 40, sino que deben ser retiradas con la mano u otro medio adecuado semejante al lavado.
- Tamizar la muestra ya pulverizada en el tamiz N° 40 y separar la fracción de suelo que pase dicho tamiz. El material que aún queda retenido en el tamiz puede ser pulverizado y tamizado de nuevo.
- Coloque el material retenido en la malla No 40 después de la operación final de pulverización en un plato y remójelo con una pequeña cantidad de agua. Revuelva esta mezcla y transfírala a la malla No 40 atrapando el agua y cualquiera de los finos suspendidos en la sartén de lavado.
Vierta esta suspensión dentro de un plato conteniendo el suelo seco previamente tamizado a través de la malla No 40, deseche el material retenido en la malla No 40.

- Colocar de 150 a 200 g del material que paso el tamiz N° 40 en una cápsula de porcelana y con una espátula mezclarla con una pequeña cantidad de agua.
- Colocar la mezcla de suelo y agua, aún en la cápsula de porcelana, en una bolsa plástica para que no pierda humedad y dejarla así por un periodo no menor a 16 horas, ya que diversos estudios han demostrado que el contenido de humedad varía de gran manera durante las primeras 12 horas de saturación.
- Una vez que se ha cumplido el periodo de saturación es preciso mezclar la muestra nuevamente para uniformizar su consistencia, y si es necesario agregar una pequeña cantidad de agua con ayuda de la piseta.

Calibración del equipo

Copa de Casagrande

Ajustar la altura de la caída de la copa, para ello se gira la manivela hasta que la copa se eleve a su mayor altura. Utilizando el calibrador de 10 mm (adosado al ranurador), se verificó que la distancia entre el punto de percusión y la base sea de 10 mm exactamente. De ser necesario, se aflojan los tornillos de fijación y se mueve el ajuste hasta obtener la altura de caída requerida. Si el ajuste es correcto se escuchará un ligero campanilleo producido por la leva al golpear el

tope de la copa; si la copa se levanta por sobre el calibre o no se escucha ningún sonido debe realizarse un nuevo ajuste.

Verificar periódicamente los aspectos siguientes:

- Que no se produzca juego lateral de la taza por desgaste del pasador que la sostiene;
- Que los tornillos que conectan la taza con el apoyo estén apretados;
- Que el desgaste de la base no exceda de 0,1 mm de profundidad. Cuando suceda esto, debe pulirse nuevamente verificando que se mantiene una resistencia tal que una bolita de acero de 8 mm de diámetro, dejada caer libremente desde una altura de 25 cm rebote entre 75% y 90%. (resistencia de la base al choque)
- Que el desgaste de los soportes no llegue al punto de quedar apoyados en sus tornillos de fijación;
- Previo a cada ensayo se verificará que la taza y la base estén limpias y secas.

Balanza de 0.01 gramos de precisión

Calibrar la balanza con la manecilla que se encuentra en la parte posterior, arriba del plato de la balanza.

Realización del ensayo

Determinación del límite líquido utilizando el método de los tres puntos.

- Colocar el aparato de límite líquido sobre una base firme.
- Cuando el suelo se ha remezclado con suficiente agua para obtener una consistencia que requiera aproximadamente de 25 a 35 golpes para cerrar la ranura, tomar una porción de la mezcla ligeramente mayor a la cantidad que se someterá a ensayo.
- Colocar esta porción en la copa con la espátula, centrada sobre el punto de apoyo de la copa con la base; comprimirla y extenderla mediante la espátula, evitando incorporar burbujas de aire en la mezcla.
- Enrasar y nivelar a 10 mm en el punto de máximo espesor. Reincorporar el material excedente a la cápsula de porcelana.
- Dividir la pasta de suelo pasando el acanalador cuidadosamente a lo largo del diámetro que pasa por el eje de simetría de la copa de modo que se forme una ranura clara y bien delineada de las dimensiones especificadas en el punto 2.3 del capítulo II. El acanalador se debe pasar manteniéndolo perpendicular a la superficie interior de la taza. En ningún caso se debe aceptar el desprendimiento de la pasta del fondo de la taza; si esto ocurre se debe retirar todo el material y reiniciar el procedimiento. La formación de la ranura se debe efectuar con el mínimo de pasadas, limpiando el acanalador después de cada pasada. En suelos donde la ranura no puede ser hecha en un solo intento sin rasgar el suelo, la ranura puede realizarse con varias

pasadas del ranurador. Alternativamente, corte la ranura ligeramente menos que las dimensiones requeridas con una espátula y use el ranurador para darle a la ranura las dimensiones finales.

- Gire la manivela levantando y dejando caer la copa con una frecuencia de dos golpes por segundo hasta que las paredes de la ranura entren en contacto en el fondo del surco a lo largo de un tramo de 13 mm ($\frac{1}{2}$ pulgada). Si el cierre de la ranura es irregular debido a burbujas de aire, descartar el resultado obtenido.
- Verifique que una burbuja de aire no cause el cierre prematuro de la ranura observando que ambos lados de la ranura hayan fluido juntos con aproximadamente la misma forma. Si una burbuja causa el cierre prematuro de la ranura reforme el suelo en la copa agregando una pequeña cantidad de suelo para completar la perdida en la operación de ranurado y repita el proceso anterior.
- Si después de varios intentos sucesivamente con alto contenido de agua, la pasta de suelo continua resbalando en la copa o el número de golpes requeridos para cerrar la ranura es siempre menor de 25, registre que el límite líquido no podrá ser determinado y reporte el suelo como no plástico sin ejecutar la prueba de límite plástico.
- Registrar el número de golpes (N) requeridos para cerrar la ranura.
- Retirar aproximadamente 10 g del material que se junta en el fondo de la ranura, con la ayuda de la espátula. Esta operación debe realizarse

manteniendo la espátula perpendicular a la superficie de la copa y la ranura, además se debe retirar el segmento que corresponde a la unión de las mitades.

- Colocar la muestra retirada en un platillo de vidrio (contenedor de masa) previamente pesado (W_{cristal}) y taparlo inmediatamente, a continuación obtener el peso húmedo del recipiente más el peso húmedo de la muestra ($W_{\text{h+cristal}}$).
- Retirar de la copa la muestra sobrante y reunirla con el resto de la muestra.
- Limpiar la copa y el ranurador.
- Volver a mezclar toda la muestra guardada agregando agua destilada mediante la piseta, para incrementar el contenido de humedad y al mismo tiempo disminuir el número de golpes requerido para cerrar la ranura. Repetir los paso anteriores para producir al menos dos números de golpes más bajos. Uno de los ensayos deberá estar entre 25 y 35 golpes, otro entre 20 y 30 y el último entre 15 y 25 golpes.
- Secar en el horno las muestras de suelo con diferentes humedades a $110 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ durante un período de 24 horas y obtener el peso seco ($W_{\text{s+cristal}}$).

Cálculos

- Determinar el contenido de humedad del espécimen de suelo para cada ensayo de acuerdo a la prueba D2216 (Determinación del contenido de humedad) y mediante la siguiente expresión:

$$w(\%) = \left[\frac{(W_{h+cristal}) - (W_{S+cristal})}{(W_{S+cristal}) - (W_{cristal})} \right] \times 100 \quad \text{Ecuación 4.2.1.3.1}$$

Donde:

W : contenido de humedad en porcentaje.

$W_{h+cristal}$: Peso de suelo húmedo + tara.

$W_{S+cristal}$: Peso de suelo seco + tara.

$W_{cristal}$: Peso de tara.

- Graficar la relación entre el contenido de humedad, $W\%$, y el número de golpes, N , en un gráfico escala semilogarítmica, con el contenido de humedad como ordenada en la escala aritmética, y el número de golpes como abscisa en la escala logarítmica.
- Dibujar una línea recta que mejor se ajuste a los puntos obtenidos.
- Elegir el contenido de humedad correspondiente a la intersección de la línea recta dibujada con la abscisa de 25 golpes como el límite líquido del suelo.

Determinación del límite líquido utilizando el método de un solo punto

- El Procedimiento a realizar en este ensayo es igual al que está descrito para el método de varios puntos, exceptuando que el número de golpes requeridos para cerrar la ranura; debe estar entre 20 y 30. Si menos de 20 o más de 30 son requeridos, ajuste el contenido de humedad del suelo y repita el proceso.

Nota

El excesivo secado o una mezcla inadecuada pueden causar que el número de golpes varíe.

- Determine el contenido de humedad de los especímenes de acuerdo con la ecuación 4.2.1.3.1, descrita anteriormente.

Cálculos

Determine el límite líquido de cada muestra usando las siguientes ecuaciones:

$$LLn = Wn \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121} \quad \text{Ecuación 4.2.1.3.2}$$

$$LLn = KWn$$

Donde:

LLn = Límite líquido unipunto para un ensayo en porcentaje.

N = Número de golpes que causan el cierre de la ranura para cada intervalo dado

W_n = contenido de humedad para cada ensayo en porcentaje.

K = Factor dado en la tabla 4.2.1.3.1

N (Número de Golpes)	K (Factor para el límite líquido)
20	0.973
21	0.979
22	0.985
23	0.990
24	0.995
25	1.000
26	1.005
27	1.009
28	1.014
29	1.018
30	1.022

Tabla 4.2.1.3.1: Factor K para diferentes números de golpes.

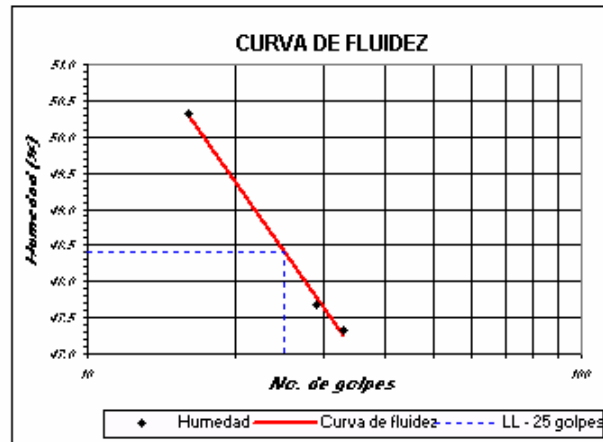
El límite líquido, es el promedio de los valores de ensayo de límite líquido cercano al número entero (Sin la designación de porcentaje)

4.2.1.4 Presentación de los resultados.

Los resultados del ensayo se colocaron en la siguiente hoja de cálculo N° 1, la cual nos dio automáticamente el límite líquido (ver figura 4.2.1.4.1).

DETERMINACIÓN DEL LIMITE LIQUIDO MUESTRA No11 SAN MIGUEL, ENSAYOS No15 Y No16							
CRISTAL No.	1/8" (g)	1/4" (g)	3/8" (g)	1/2" (g)	3/4" (g)	HUMEDAD (%)	No. GOLPES
LIMITE LIQUIDO							
1	29.02	26.01	3.01	19.65	6.36	47.33	33
2	30.94	28.16	2.78	22.33	5.83	47.68	29
3	28.27	25.10	3.17	18.80	6.30	50.32	16

L.L. (%) = 48.4



CRISTAL No.	1/8" (g)	1/4" (g)	3/8" (g)	1/2" (g)	3/4" (g)	HUMEDAD (%)	No. GOLPES
LIMITE LIQUIDO							
1	27.93	25.15	2.78	19.24	5.91	47.04	31
2	28.77	25.87	2.90	19.83	6.04	48.01	25
3	31.12	27.14	3.98	19.22	7.92	50.25	19

L.L. (%) = 48.3

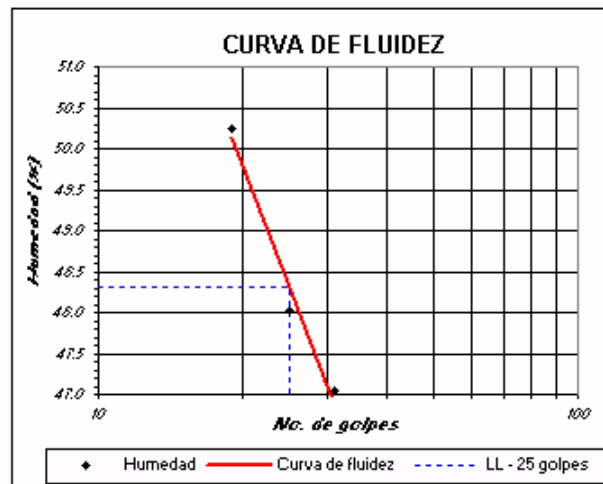


Figura 4.2.1.4.1: Hoja de cálculo N° 1 (en excel), para ensayo de límite líquido.

4.2.2 Limite Plástico

4.2.2.1 Alcance de la Prueba

- Este método de ensayo cubre la determinación del límite plástico, presentando tanto sus procedimientos como el equipo necesario para llevar a cabo la prueba.
- El límite plástico y líquido de los suelos (Junto con el límite de contracción) esta muchas veces referido colectivamente como los límites de Atterberg. Estos son límites fronteras de los diferentes estados de consistencia de los suelos plásticos.
- El límite plástico de muchos suelos que han sido secados antes de la prueba pueden ser considerablemente diferentes de los valores obtenidos en las muestras no secadas. Si los límites líquidos de los suelos son usados para correlacionar o estimar el comportamiento ingenieril de los suelos en su estado de humedad natural; no se debe permitir el secado de las muestras antes de probarlas a menos que la información sobre las muestras secas sean específicamente las deseadas.
- Los procedimientos que se describen a continuación son ejecutados solo en la porción de suelo que pasa la malla No 40 (425 μ m). Por consiguiente la contribución relativa de esta porción de suelo a las propiedades de la muestra debe ser considerada como un todo cuando se usen estas pruebas para evaluar las propiedades de un suelo.

4.2.2.2 Descripción del equipo.

Para la determinación del límite plástico se utilizó: El método del rolado.

Equipo necesario:

- Placa de vidrio

Una placa de vidrio grueso con un mínimo de 30 cm (12 in) de lado por 1 cm (3/8 in) de grosor para hacer los rollos para el límite plástico.

El equipo que se menciona a continuación debe cumplir con lo estipulado en la norma A.S.T.M. D 4318-00, dichas características ya fueron mencionadas anteriormente el ensayo del límite líquido. Por lo que no se describirán nuevamente.

- Espátula
- Platillos de vidrio
- Balanza con precisión de ± 0.01 g.
- Horno para secado con circulación de aire y temperatura regulable.

4.2.2.3 Procedimiento para realizar el ensayo.

Se empleó una parte del suelo utilizado para obtener el límite líquido al cual se le continuó bajando la humedad hasta conseguir una consistencia en la cual la muestra pudiese ser rolada sin que se adhiriera a la mano cuando sea extendida o cuando se este mezclando sobre la placa de vidrio. El proceso de secado puede ser acelerado por la exposición del suelo a la corriente de aire de un

ventilador eléctrico o por secado con papel que no agregue ninguna fibra al suelo.

El papel debe tener una superficie dura como el papel toalla o un papel filtro con alta resistencia a la humedad.

- Se tomaron pequeñas porciones de suelo aproximadamente de 1.5 a 2.0 gramos y con este se formó una masa elipsoidal.
- Se roló esta masa colocándola entre los dedos de las manos y la placa de vidrio y con suficiente presión, la cual variara dependiendo del tipo de suelo que se está analizando, se hizo un cilindro o rollito con un diámetro uniforme en toda su longitud, la velocidad de rolado fue aproximadamente de 80 a 90 pasadas por minuto, entendiéndose como una pasada al movimiento completo de la mano hacia delante y hacia atrás.
- Cuando el diámetro del cilindro llegó al 1/8 de pulgada se procedió a dividirlo en 6 u 8 fragmentos, los cuales fueron unidos nuevamente con los dedos y pulgares de ambas manos, hasta lograr que la masa tomara una forma elipsoidal, esto se hace con el objetivo de disminuir el contenido de humedad de la muestra, una vez más se roló la masa para formar rollitos de 1/8 de pulgada.
- Se continuaron rolando dichos cilindros disminuyendo su diámetro hasta llegar a que, a un diámetro igual a 1/8 de pulgada, el cilindro se comenzase a resquebrajar y ya no fuera posible obtener cilindros o rollitos de 1/8 de pulgada de diámetro.

Nota: El operador no debe intentar producir la falla exactamente al diámetro de 3.2 mm permitiendo que el hilo alcance los 3.2 mm.

- Se colocaron 6 a 8 cilindros en ese estado dentro de un platillo de vidrio el cual había sido previamente pesado (Tara) y se registró su peso (Peso de suelo húmedo y tara).
- Se repitió todo el proceso anterior hasta obtener una masa de suelo de aproximadamente 6 gramos.
- Se secaron al horno a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por un período de 24 horas y se obtuvo el peso seco (Peso de suelo seco y tara).
- Determinamos la humedad correspondiente al límite plástico del suelo mediante la siguiente expresión:

$$w(\%) = \left[\frac{(W_{h+\text{cristal}}) - (W_{s+\text{cristal}})}{(W_{s+\text{cristal}}) - (W_{\text{cristal}})} \right] \times 100 \quad \text{Ecuación 4.2.2.3.1}$$

Donde:

W : contenido de humedad en porcentaje.

$W_{h+\text{cristal}}$: Peso de suelo húmedo + tara.

$W_{s+\text{cristal}}$: Peso de suelo seco + tara.

W_{cristal} : Peso de tara.

4.2.2.4 Presentación de los resultados.

Como en el límite líquido, los resultados se colocaron en una hoja de cálculo, la cual llamamos hoja de cálculo N° 2 y que nos dio automáticamente el límite plástico (4.2.2.4.1).



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
 ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA



**LÍMITES DE CONSISTENCIA E ÍNDICES
 ASTM D 4 2 4**

Hoja No: 1
 Ensayo No: Indicados
 Fecha: Ago-06
 Laboratorista: MEM Y RAG
 Calculó: MEM Y RAG

Solicita: _____
 Proyecto: Trabajo de graduación
 Ubicación: San Miguel
 Muestra: 8 Material: Arcilla Pozo No: 8 Profundidad: 1.50 m

	LÍMITE PLÁSTICO								
Ensayo No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Recipiente No	36	81	82	C	82	81	36	43	77
Peso de suelo Húmedo y tara (g)	25.16	40.00	35.72	42.36	31.53	33.35	29.85	28.74	42.30
Peso de suelo seco y tara (g)	22.65	36.40	32.95	38.16	29.68	31.04	26.36	24.62	37.93
Tara (g)	13.31	22.27	22.45	20.22	22.47	22.45	13.44	10.34	22.24
Peso de agua (g)	2.51	3.60	2.77	4.20	1.85	2.31	3.49	4.12	4.37
Peso de suelo seco (g)	9.34	14.13	10.50	17.94	7.21	8.59	12.92	14.28	15.69
Contenido de agua (%)	26.87	25.48	26.38	23.41	25.66	26.89	27.01	28.85	27.85

	LÍMITE PLÁSTICO								
Ensayo No.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Recipiente No	100	18	91	94	82	77	43	1	1
Peso de suelo Húmedo y tara (g)	48.27	43.86	49.15	41.85	49.45	39.41	25.73	37.95	34.75
Peso de suelo seco y tara (g)	44.33	39.30	43.50	37.70	44.00	36.00	22.55	34.25	31.55
Tara (g)	29.83	22.23	22.33	22.33	22.54	22.31	10.34	19.68	18.80
Peso de agua (g)	3.94	4.56	5.65	4.15	5.45	3.41	3.18	3.70	3.20
Peso de suelo seco (g)	14.50	17.07	21.17	15.37	21.46	13.69	12.21	14.57	12.75
Contenido de agua (%)	27.17	26.71	26.69	27.00	25.40	24.91	26.04	25.39	25.10

	LÍMITE PLÁSTICO								
Ensayo No.	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Recipiente No	4	E	A	94	77	82	91	43	H
Peso de suelo Húmedo y tara (g)	34.64	32.45	36.03	30.74	30.47	33.31	32.00	19.32	28.27
Peso de suelo seco y tara (g)	31.74	30.14	32.74	29.10	29.03	31.25	30.26	17.75	26.61
Tara (g)	19.64	19.83	19.22	22.30	22.30	22.41	22.32	10.33	19.65
Peso de agua (g)	2.90	2.31	3.29	1.64	1.44	2.06	1.74	1.57	1.66
Peso de suelo seco (g)	12.10	10.31	13.52	6.80	6.73	8.84	7.94	7.42	6.96
Contenido de agua (%)	23.97	22.41	24.33	24.12	21.40	23.30	21.91	21.16	23.85

Figura 4.2.2.4.1: Hoja de cálculo Nº 2 (en excel), para ensayo de límite plástico.

4.2.2.5 Índice de Plasticidad

Cálculos

Calcule el índice de plasticidad como se sigue:

$$IP = LL - LP$$

Donde:

LL = Límite líquido (Número Entero)

LP = Límite plástico (Número Entero)

Ambos LL y LP son números enteros. Si cada límite líquido o límite plástico no pueden ser determinados o si el límite plástico es equivalente o más grande que el límite líquido, reporte el suelo como no plástico NP.

4.2.3 Limite de Contracción (Basado en Norma A.S.T.M. 427-98)

4.2.3.1 Alcance de la Prueba

- Este método de ensayo cubre la determinación del límite contracción, presentando tanto sus procedimientos como el equipo necesario para llevar a cabo la prueba.
- El límite de contracción junto con los límites plástico y líquido de los suelos, son muchas veces referidos colectivamente como los límites de Atterberg. Estos son límites fronteras de los diferentes estados de consistencia de los suelos plásticos.
- Los procedimientos que se describen a continuación son ejecutados solo en la porción de suelo que pasa la malla No 40 (425 μ m). Por consiguiente la contribución relativa de esta porción de suelo a las propiedades de la muestra debe ser considerada como un todo cuando se usen estas pruebas para evaluar las propiedades de un suelo.

4.2.3.2 Descripción del equipo.

A continuación describimos el equipo utilizado para el desarrollo del ensayo:

- Espátula, con una hoja flexible de aproximadamente 75 mm de largo por 20 mm de ancho (ver figura 4.2.1.2.5).
- Placa de vidrio para enrasar la taza de vidrio (ver figura 4.2.3.2.1).

- Recipiente de contracción o de Monel; que no es más que un molde cilíndrico, metálico con el fondo plano y de aproximadamente 45 mm de diámetro y 13 mm de altura (ver figura 4.2.3.2.1).
- Regla de enrase de acero, de aproximadamente 150 mm de largo.
- Taza de vidrio (recipiente volumétrico de cristal), de aproximadamente 60 mm de diámetro y 30 mm de altura, con su borde superior pulido y esencialmente paralela a la base (ver figura 4.2.3.2.1).
- Cápsula de porcelana; de aproximadamente 60 mm de diámetro y 30 mm de altura, con su borde superior pulido y esencialmente paralela a la base (ver figura 4.2.1.2.4).
- Placa de vidrio, con tres puntas para sumergir la muestra en el mercurio (ver figura 4.2.3.2.1).
- Balanza, con una precisión de 0.01 g (ver figura 4.2.1.2.3).
- Mercurio, suficiente para llenar la taza de vidrio.
- Horno para secado con circulación de aire y temperatura regulable (ver figura 4.2.1.2.9).
- Bandeja de vidrio, preferiblemente, de profundidad suficiente para contener el mercurio derramado accidentalmente.
- Misceláneos: franela, piseta, cepillo de plástico, bolsas plásticas y aceite.

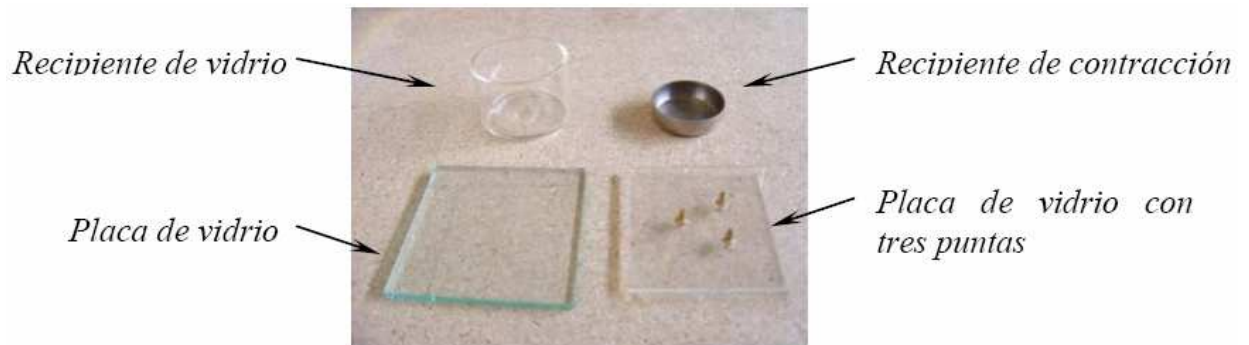


Figura 4.2.3.2.1: Equipo utilizado para ensayo de límite de contracción

4.2.3.3 Procedimiento para realizar el ensayo.

Calibración del recipiente de contracción o de Monel.

- Pesar y registrar la masa (en gramos) del recipiente de contracción vacío (W_{rc}) (ver figura 4.2.3.3.1).



Figura 4.2.3.3.1: Determinación del peso recipiente de monel.

- Colocar el recipiente de contracción dentro de la cápsula de porcelana (para recoger el mercurio que se derrame), colocar mercurio dentro del recipiente y una vez que el mercurio se caiga ligeramente se coloca la placa de vidrio en la parte superior para enrasarlo, observando que no quede aire atrapado entre la placa y el mercurio, en caso de que exista aire deberá repetirse este proceso (ver figura 4.2.3.3.2).



Figura 4.2.3.3.2: Colocación de mercurio al recipiente de monel.

- Pesar el recipiente lleno de mercurio (W_{rc+m}) (ver figura 4.2.3.3.3).



Figura 4.2.3.3: Determinación del peso recipiente de monel con mercurio.

- Vaciar el mercurio utilizado en su contenedor, procurando no desperdiciarlo debido a un mal manejo.

Preparación de la muestra.

- Tomar por cuarteo, una fracción de la muestra que garantice una masa de aproximadamente 30 g.
- Tomar la muestra de ensayo del material completamente homogeneizado que pasa por el tamiz N° 40.
- Colocar la muestra en la cápsula de porcelana y mezclar completamente, con agua destilada en una cantidad suficiente para llenar completamente los huecos del suelo (ver figura 4.2.1.3.1), y dejar el suelo suficientemente pastoso para colocarlo en el recipiente de Monel sin inclusión de burbujas de aire.

Nota: La humedad necesaria para alcanzar la consistencia requerida en suelos poco plásticos es igual o ligeramente superior a la del límite líquido y en suelos altamente plásticos puede excederla hasta en un 10%.

Ensayo.

- Recubrir el interior del recipiente de Contracción con una capa delgada de lubricante por ejemplo, vaselina o aceite de silicón para prevenir la adherencia de suelo al molde (ver figura 4.2.3.3.4).



Figura 4.2.3.3.4: Recubrimiento del recipiente de monel.

- Colocar una porción de suelo húmedo de aproximadamente un tercio de la capacidad del recipiente de contracción en el centro de este y extenderlo hasta los bordes, golpeando el recipiente contra una superficie firme amortiguada con un paño de tela o diferentes capas de papel.

- Agregar una segunda porción similar a la primera y golpear el recipiente hasta que el suelo este completamente compactado y todo el aire atrapado suba a la superficie.
- Agregar la última porción de material y compactar hasta que el recipiente este completamente lleno y con exceso de suelo sobre el borde (ver figura 4.2.3.3.5).



Figura 4.2.3.3.5: Colocación de la muestra en el recipiente de monel.

- Enrasar el recipiente de contracción con la regla enrasadora y limpiar posibles restos de suelo adherido al exterior del recipiente.
- Inmediatamente de enrasado, pesar el recipiente con el suelo compactado ($W_{rc + sh}$) (ver figura 4.2.3.3.6).



Figura 4.2.3.3.6: Determinación del peso del recipiente de monel con suelo húmedo.

- Dejar secar lentamente al aire hasta que la pastilla de suelo moldeado se despegue de las paredes del recipiente o hasta que cambie de color oscuro a claro (ver figura 4.2.3.3.7).

Nota: Se recomienda efectuar el ensayo, hasta el inicio del secado, en cámara húmeda. Si no se cuenta con este dispositivo se deben tomar todas las precauciones necesarias para reducir la evaporación.



Figura 4.2.3.3.7: Muestra de suelo contraída luego del secado.

- Secar en horno a 110 ± 5 °C hasta conseguir en la muestra una masa constante (ya no hay cambios de volumen).

Nota: Si el suelo se agrieta después del secado, ya sea al aire o en el horno, eliminarlo y realizar otro ensayo utilizando una muestra con un menor contenido de agua.

- Pesar el recipiente con el suelo seco ($W_{rc + ss}$) (ver figura 4.2.3.3.8).



Figura 4.2.3.3.8: Determinación del peso del recipiente de monel con suelo seco.

- Colocar la taza de vidrio adentro de la cápsula de porcelana y llenar la taza de vidrio con mercurio hasta que desborde, enrasar presionando con la placa de vidrio sin que existan burbujas de aire entre el plato y el mercurio, a continuación limpiar los restos de mercurio adheridos al exterior del recipiente (ver figura 4.2.3.3.9);



Figura 4.2.3.3.9: Colocación de mercurio en la taza de vidrio.

- Pesar la taza de vidrio llena de mercurio (W_{cc+m}) (ver figura 4.2.3.3.10)



Figura 4.2.3.3.10: Determinación del peso taza de vidrio con mercurio.

- Colocar el trozo de suelo sobre la superficie del mercurio y sumergirlo cuidadosamente mediante las puntas de la placa de vidrio hasta que esta tope firmemente contra el borde del recipiente (ver figura 4.2.3.3.11). Es esencial que no quede aire atrapado bajo el trozo de suelo ni bajo la placa de vidrio.



Figura 4.2.3.3.11: Introducción de la pastilla de suelo seco en taza de vidrio con mercurio.

- Retirar la pastilla de suelo seco y pesar la taza de vidrio con el mercurio residual ($W_{cc + mdesp}$)(ver figura 4.2.3.3.12).



Figura 4.2.3.3.12: Determinación del peso de la taza de vidrio con mercurio residual.

- Calcular la humedad del suelo en el momento en que fue moldeado de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$W(\%) = \left[\frac{(W_{rc+sh} - W_{rc+ss})}{W_{rc+ss} - W_{rc}} \right] \times 100 \quad \text{Ecuación 4.2.3.3.1}$$

Donde:

$W(\%)$ = humedad de la muestra en porcentaje

W_{rc+sh} = Peso del recipiente de monel + suelo húmedo

W_{rc+ss} = Peso del recipiente de monel + suelo seco

W_{rc} = Peso del recipiente de monel

- Cálculo de la masa del mercurio desplazado por la muestra de suelo:

$$W_{md} = W_{cc+m} - W_{cc+m\text{desp}} \quad \text{Ecuación 4.2.3.3.2}$$

Donde:

W_{md} = Peso desplazado de mercurio por pastilla de suelo

W_{cc+m} = Peso de taza de vidrio + mercurio

$W_{cc+m\text{desp}}$ = W_{cc+m} después de introducir la pastilla de suelo

- Cálculo del volumen desplazado por la muestra de suelo.

$$V_{ps} = \frac{W_{md}}{\rho_{mercurio}}$$

Ecuación 4.2.3.3.3

Donde:

V_{ps} = Volumen de la pastilla seca

W_{md} = Peso desplazado de mercurio por pastilla de suelo

$\rho_{mercurio}$ = Densidad del mercurio con valor de 13.55 g/cm³

- Calcular el límite de contracción, del suelo de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$Lc = W(\%) - \left(\frac{(V_m - V_{ps})\rho_{mercurio}}{W_{rc+ss} - W_{rc}} \right) \times 100 \quad \text{Ecuación 4.2.3.3.4}$$

Donde:

Lc = Límite de contracción en porcentaje;

W(%) = humedad del suelo en el momento que fue moldeado en porcentaje;

V_m = Volumen de la pastilla de suelo húmedo;

V_{ps} = Volumen de la pastilla de suelo seco;

$\rho_{mercurio}$ = Densidad del mercurio con valor de 13.55 g/cm³

W_{rc+sc} = Peso del recipiente de monel + suelo seco

W_{rc} = Peso del recipiente de monel

4.2.3.4 Presentación de los resultados.

Así como en los dos límites anteriores, los resultados se colocaron en la hoja de cálculo N° 3, la cual nos dio automáticamente el límite de contracción (ver figura 4.2.3.4.1).



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES
 ING. MARIO ANGEL GUZMAN URBINA



LÍMITES DE CONSISTENCIA E ÍNDICES
ASTM D 4 2 4
 ASTM D 4 2 3

Solicita: _____
 Proyecto: Trabajo de graduación
 Ubicación: San Miguel
 Muestra: 3 Material: Arcilla Pozo No: 3

Hoja No: 1
 Ensayo No: Indicados
 Fecha: Dic-06
 Laboratorista: MEM Y RAG
 Calculó: MEM Y RAG
 Profundidad: 1.50 m

Ensayo No	1	2	3	4
Tara	4	3	7	2
Peso de recipiente de monel (g) Wrc	13.34	13.34	13.34	13.34
Peso de recipiente de monel + mercurio (g) Wrc+m	196.86	195.89	196.00	195.89
Peso de mercurio en el recipiente de monel (g) Wm	183.52	182.55	182.66	182.55
Volumen de mercurio en el recipiente de monel cm ³ Vm	13.54	13.47	13.48	13.47
Peso del recipiente de monel + suelo húmedo (g) Wrc+sh	36.31	35.78	36.30	36.20
Peso del recipiente de monel + suelo seco (g) Wrc+ss	28.63	28.50	28.55	28.94
Contenido de humedad (%) W%	50.23	48.02	50.95	46.54
Peso de taza de vidrio (g) Wcc	13.44	13.44	13.44	13.44
Peso de taza de vidrio + mercurio (g) Wcc+m	259.00	259.01	258.99	259.06
Wcc+m después de introducir la pastilla de suelo (g) Wcc+mdesp	130.05	130.06	130.02	130.02
Peso desplazado de mercurio por pastilla de suelo (g) Wmd	128.95	128.95	128.97	129.04
Volumen de pastilla seca (cm ³) Vps	9.52	9.52	9.52	9.52
Variación de volumen (cm ³) ΔV	4.03	3.96	3.96	3.95
Límite de contracción (%) Lc	23.89	21.93	24.90	21.22

Ensayo No	5	6	7	8
Tara	4	8	1	3
Peso de recipiente de monel (g) Wrc	13.34	13.34	13.34	13.34
Peso de recipiente de monel + mercurio (g) Wrc+m	196.85	196.86	196.87	196.86
Peso de mercurio en el recipiente de monel (g) Wm	183.51	183.52	183.53	183.52
Volumen de mercurio en el recipiente de monel cm ³ Vm	13.54	13.54	13.54	13.54
Peso del recipiente de monel + suelo húmedo (g) Wrc+sh	36.23	36.33	36.32	36.30
Peso del recipiente de monel + suelo seco (g) Wrc+ss	28.91	28.67	28.65	28.67
Contenido de humedad (%) W%	47.01	49.97	50.10	49.77
Peso de taza de vidrio (g) Wcc	13.44	13.44	13.44	13.44
Peso de taza de vidrio + mercurio (g) Wcc+m	259.02	259.21	259.04	259.12
Wcc+m después de introducir la pastilla de suelo (g) Wcc+mdesp	130.07	130.43	130.03	130.02
Peso desplazado de mercurio por pastilla de suelo (g) Wmd	128.95	128.78	129.01	129.10
Volumen de pastilla seca (cm ³) Vps	9.52	9.50	9.52	9.53
Variación de volumen (cm ³) ΔV	4.03	4.04	4.02	4.02
Límite de contracción (%) Lc	21.15	23.61	23.82	23.57

Figura 4.2.3.4.1: Hoja de cálculo N° 3 (en excel), para ensayo de límite de contracción.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

En el capítulo anterior se describieron las pruebas de laboratorio practicadas a las muestras en estudio; a continuación estudiaremos el procedimiento a seguir para analizar los resultados proporcionados por dichos ensayos

5.1 Prueba de difracción de rayos “X”

La identificación de los minerales en fase cristalina reflejados por el difractograma de cada muestra (ver figura 4.1.3.1), se hizo por medio del método de “Hanawalt” (ver sección 2.5); el cual se basa en los valores de espaciamiento “d” de cada pico que aparece en el difractograma.

Como los espectros obtenidos fueron producto del programa LABVIEW/FÉNIX v2.0, fue necesario contar con un programa de identificación de dichos espectros. El CIAN nos proporcionó el programa TRACES v4.0 en versión demo, con el cual pudimos establecer los valores de “d” y “ 2θ ” correspondientes a cada pico.

El procedimiento de identificación de los archivos obtenidos con FÉNIX v2.0 por el programa TRACES se describe a continuación:

- 1) Abrimos los programas LABVIEW/FÉNIX v2.0 y TRACES v4.0 en su versión demo,
- 2) En la ventana principal del FÉNIX v2.0 desplegamos el menú file y buscamos la opción examinar, con lo que nos aparecerá todos los archivos guardados,
- 3) Seleccionamos el archivo asignándole el nombre de “demoka2.cpi” y le damos aceptar,
- 4) Vamos al programa TRACES versión demo, en el menú file seleccionamos open identificando automáticamente el archivo guardado siempre y cuando posea el nombre “demoka2.cpi” debido a que, por ser una versión demo, el programa no permite leer archivos que no sean demostrativos; sin embargo el programa ha sido modificado para poder importar los espectros generados por el difractor y guardados como archivos cpi en el programa FENIX v2.0.

Al tener los archivos compatibles con el programa TRACES, procedimos al análisis de los difractogramas por medio de los siguientes pasos:

- 1) Abrimos el programa TRACES en su versión demo,
- 2) En el menú file seleccionamos la opción open (ver figura 5.1.1),

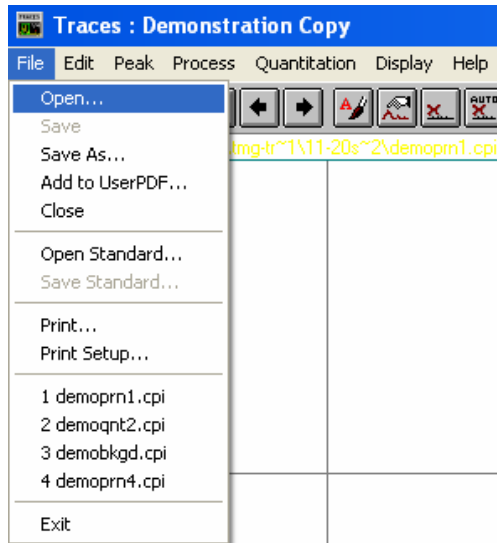


Figura 5.1.1: Procedimiento para abrir un archivo en el programa TRACES v4.0

3) Seleccionamos el archivo a analizar y le damos ok (ver figura 5.1.2),

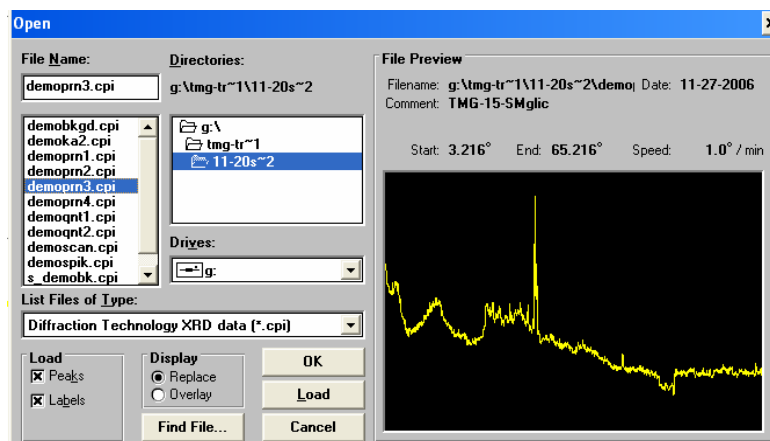


Figura 5.1.2: Selección del archivo a analizar

- 4) En la barra de herramientas seleccionamos el botón “Smooth the scan” (ver figura 5.1.3) para suavizar el trazo a 13 puntos (esto se refiere a eliminar los efectos causados por el ruido instrumental en el trazo del espectro),



Figura 5.1.3: Botón para suavizar el trazo del difractograma

- 5) Con la ayuda del botón “Peak Search” (ver figura 5.1.4) el programa busca automáticamente picos,



Figura 5.1.4: Botón búsqueda automática de picos

- 6) Si existiera algún pico no considerado por el programa pero a juicio del analista se debe de estudiar, se puede seleccionar dando un clic izquierdo sobre el pico,
- 7) Con los picos identificados (ver figura 5.1.5) se procede a obtener el valor “d” de cada pico, dando un clic derecho sobre el pico; con esto la información del pico aparecerá en la parte inferior izquierda de la pantalla (ver figura 5.1.6),

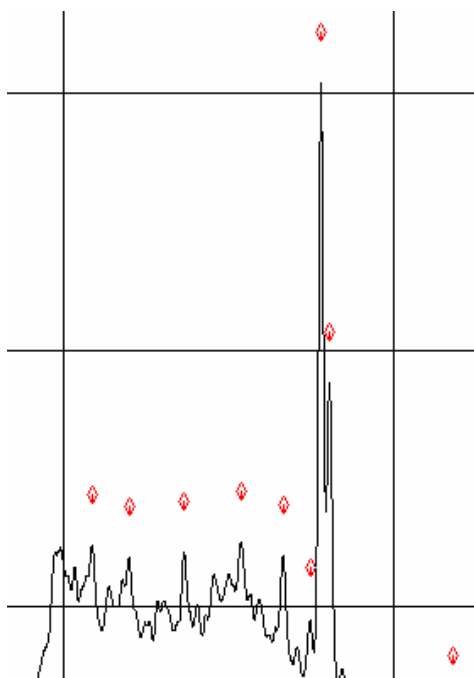


Figura 5.1.5: Picos identificados ya sea manual o automáticamente

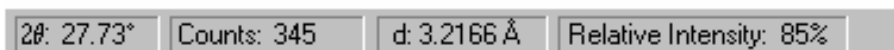


Figura 5.1.6: Información proporcionada por el programa TRACES v4.0

- 8) Una vez que se tienen los valores de los picos aplicamos Hanawalt para la determinación de los minerales, primero se identifican los tres picos de mayor intensidad (I_1, I_2, I_3),
- 9) Buscamos dichos valores en la base de datos correspondiente para ver si coinciden con algún compuesto patrón,
- 10) Si los tres picos coinciden, se buscan los picos que siguen en intensidad, tomando los que corresponden al compuesto identificado,
- 11) En caso que no encontráramos coincidencia con ningún compuesto patrón para estos tres picos; buscamos nuevas combinaciones con los demás picos (por ejemplo $I_1, I_2, I_4; I_1, I_3, I_4$; etc),
- 12) Cuando tengamos definido el primer compuesto, identificando todos los picos correspondientes; volvemos a repetir el procedimiento con los picos no identificados los cuales forman parte de otro compuesto; y así sucesivamente hasta que todos los picos del difractograma se encuentren identificados, considerando siempre las intensidades de mayor a menor.

De esta manera se obtuvieron los minerales que componen las muestras en estudio, por medio de difracción de rayos "x".

5.2.1 Minerales arcillosos encontrados en las muestras de San Miguel

Como se menciona en el capítulo III sección 3.2.2, en este banco se extrajeron un total de 20 muestras y todas fueron examinadas mediante la difracción de rayos X. En la mayoría de las muestras el resultado arrojado por los difractogramas fue muy similar, encontrándose principalmente minerales arcillosos de los grupos de las esmectitas, cloritas y de las caolinitas, este ultimo grupo representado especialmente por la halloysita.

A continuación se presenta la tabla 5.2.1.1 donde se muestran los diferentes minerales arcillosos encontrados en cada una de las muestras en el banco de San Miguel.

ARCILLA ENCONTRADA EN BANCO DE SAN MIGUEL

TIPO DE ARCILLA						
Muestra	Saponita	Nontronita	Montmorillonita	Montmorillonita-Clorita	Clorita	Halloysita
1	X	X	X			
2	X	X	X			
3	X	X	X			
4	X	X	X			
5			X	X		
6	X		X	X		
7	X		X	X		
8	X			X	X	
9	X			X	X	
10	X			X	X	
11	X			X	X	
12	X			X	X	
13	X			X	X	
14	X				X	X
15	X				X	X
16	X				X	X
17	X		X	X		X
18	X		X	X		X
19	X		X	X		X
20	X		X	X		X

Tabla 5.2.1.1: Tipos de minerales arcillosos encontrados en banco de San Miguel.

De lo que podemos decir que para este banco encontramos, de la muestra tomada en campo (20 sondeos), se encuentra constituida por un 30% de Saponita, 6% de Nontronita, 18% Montmorillonita, 21% Montmorillonita – Clorita (interestratificada), 14% Clorita y 11% Halloysita.

Con la tabla anterior y la ubicación de los sondeos, identificamos las zonas donde se encuentran los diferentes minerales arcillosos, lo cual plasmamos en los siguientes mapas.

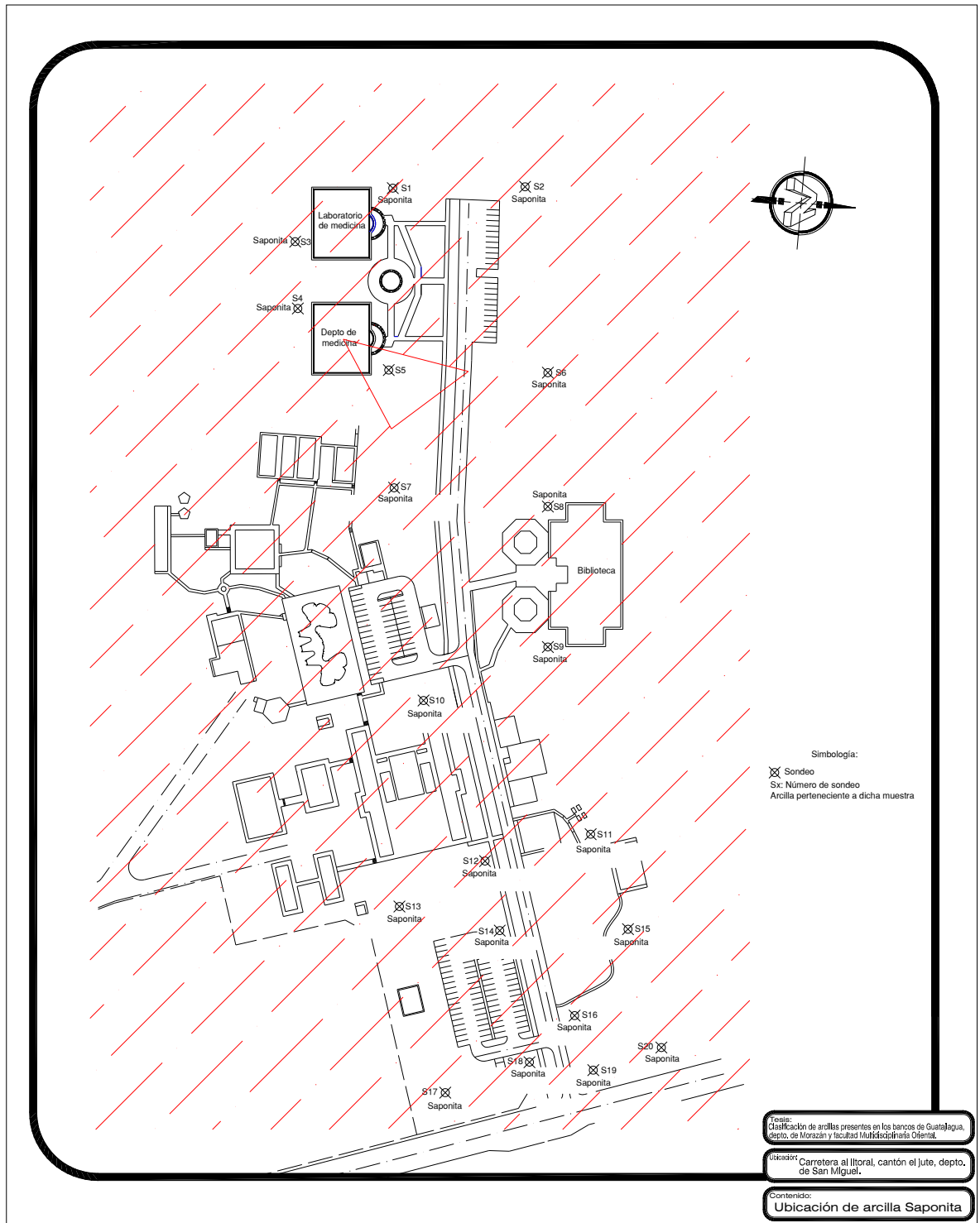


Figura 5.2.1.1: Saponita encontrada en banco de San Miguel.

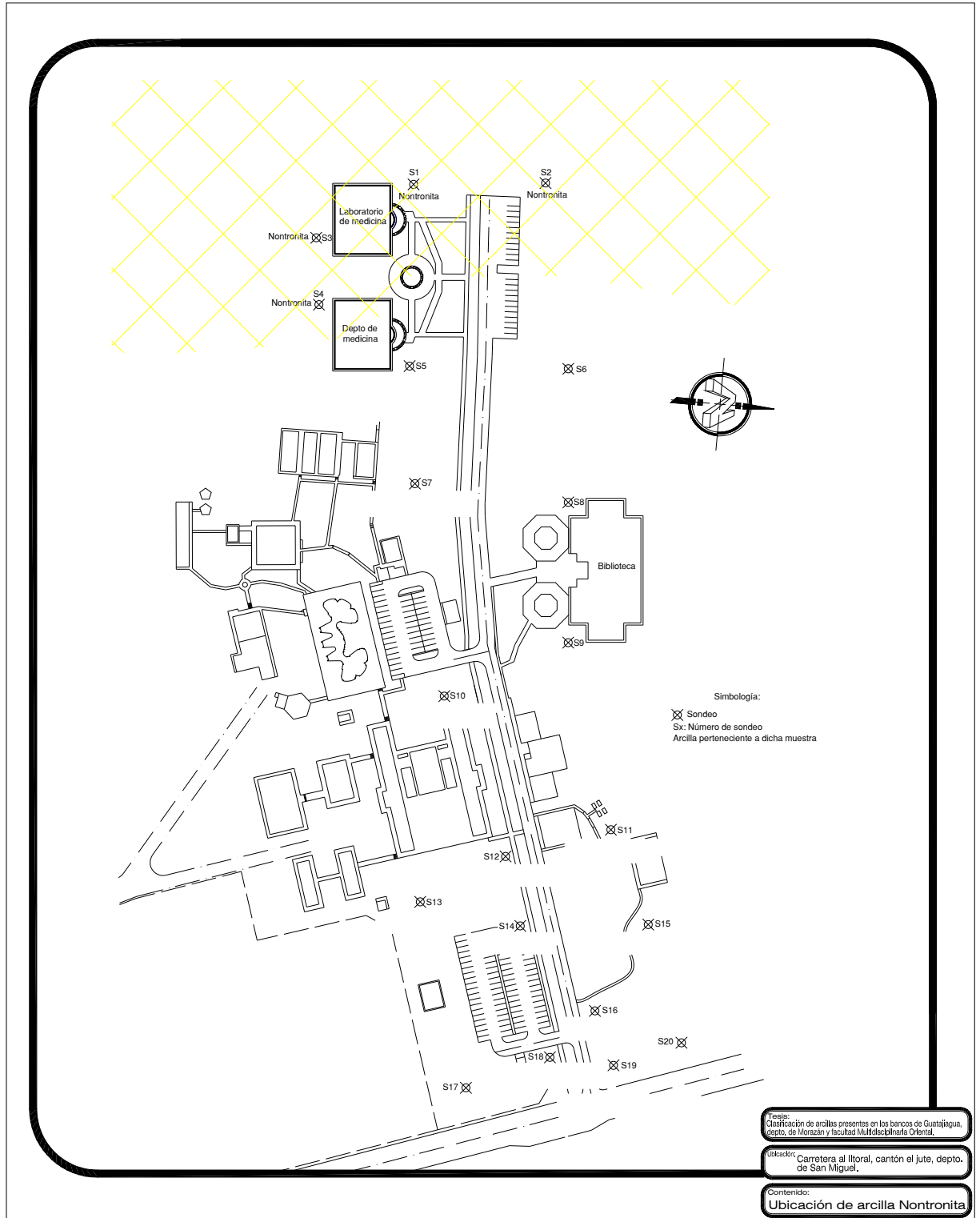


Figura 5.2.1.2: Nontronita encontrada en banco de San Miguel.

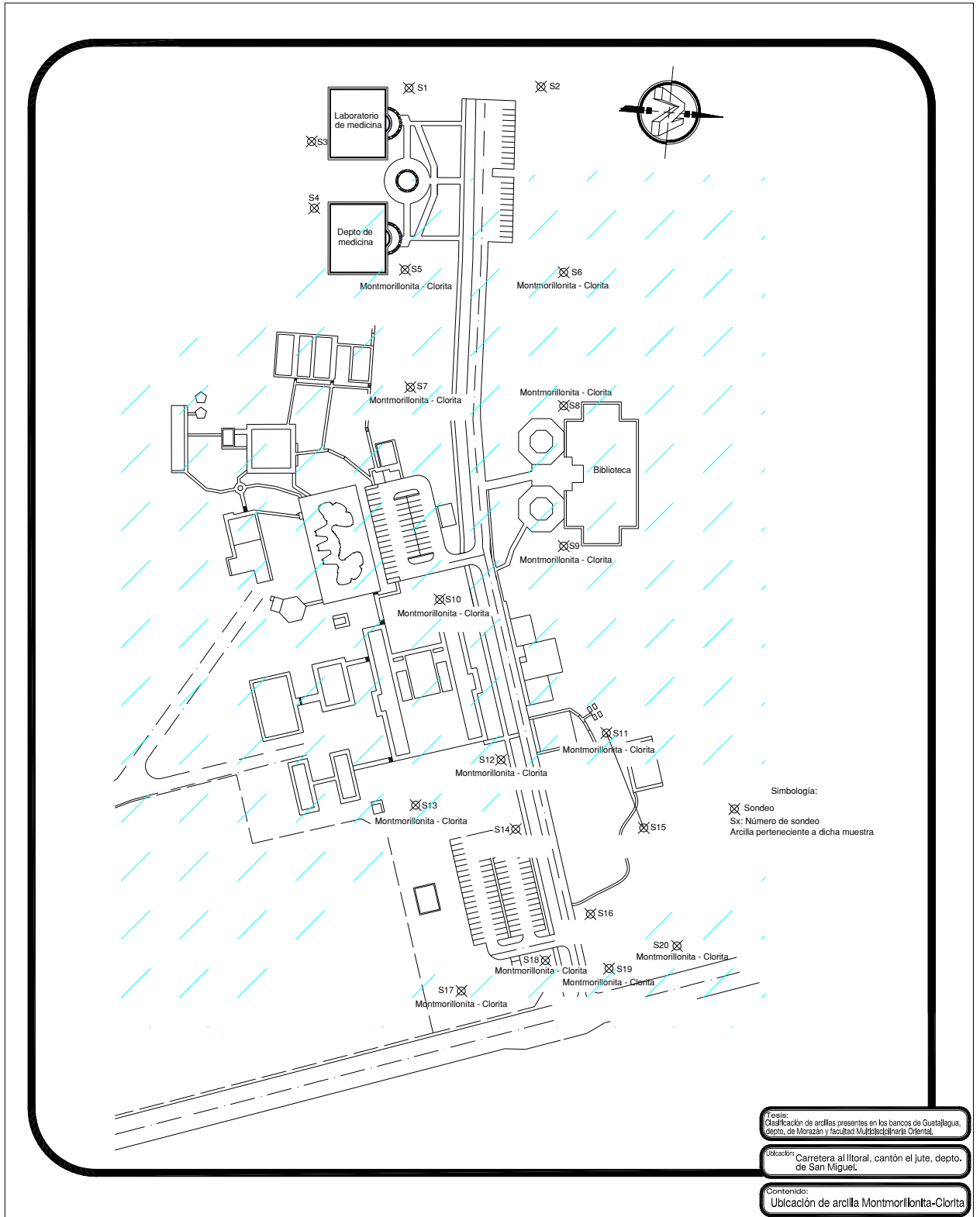


Figura 5.2.1.4: Montmorillonita-Clorita encontrada en banco de San Miguel.

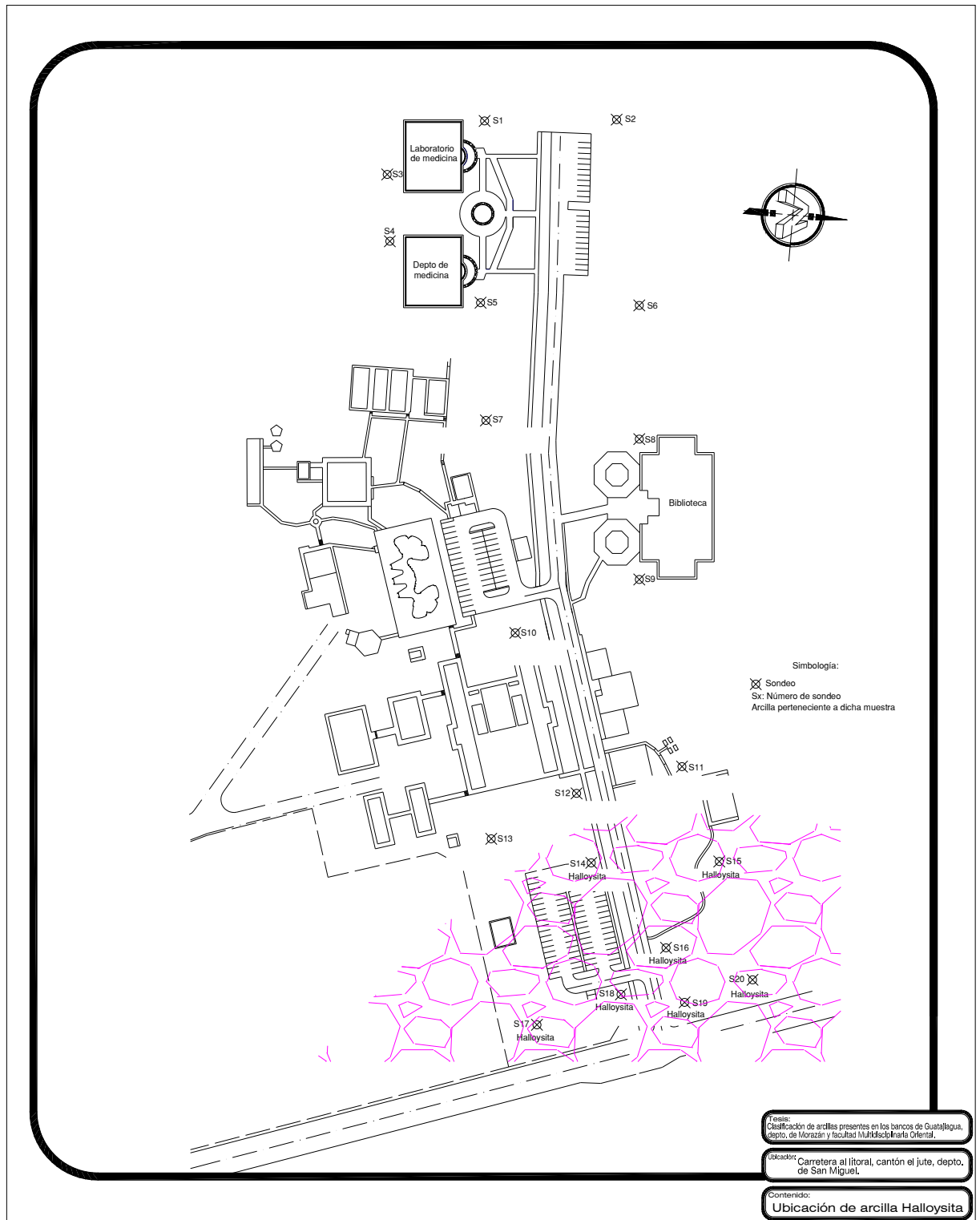


Figura 5.2.1.6: Halloysita encontrada en banco de San Miguel.

5.2.2 Minerales arcillosos encontrados en las muestras de Guatajiagua

En este banco se extrajeron 12 muestras (ver capítulo III, sección 3.2.1), aunque los resultados obtenidos mediante difracción de rayos X son bastante similares para cada una de estas muestras, cabe mencionar que estas difieren un poco con los minerales encontrados en el banco de San Miguel.

Igual que en el banco anterior, mostramos a continuación la tabla 5.2.2.1 con los minerales arcillosos encontrados en cada una de las muestras para el banco de Guatajiagua.

ARCILLA ENCONTRADA EN BANCO DE GUATAJIAGUA

TIPO DE ARCILLA

Muestra	Saponita	Nontronita	Montmorillonita	Clorita	Halloysita	Zeolita	Bentonita
1	X		X	X		X	
2			X	X			X
3			X	X		X	X
4			X	X		X	X
5			X	X		X	X
6			X	X		X	X
7	X			X		X	
8	X			X			
9		X		X	X		
10		X		X	X		
11		X		X	X		
12		X		X	X		

Tabla 5.2.2.1: Tipos de minerales arcillosos encontrados en banco de Guatajiagua.

Para el banco de Guatajiagua encontramos que, de la muestra tomada en campo (12 sondeos), se encuentra constituida por un 7% de Saponita, 10% de Nontronita, 15% Montmorillonita, 30% Clorita, 10% Halloysita, 15% Zeolita y 13% Bentonita.

Con la tabla anterior y la ubicación de los sondeos, identificamos las zonas donde se encuentran los diferentes minerales arcillosos, lo cual plasmamos en los siguientes mapas.

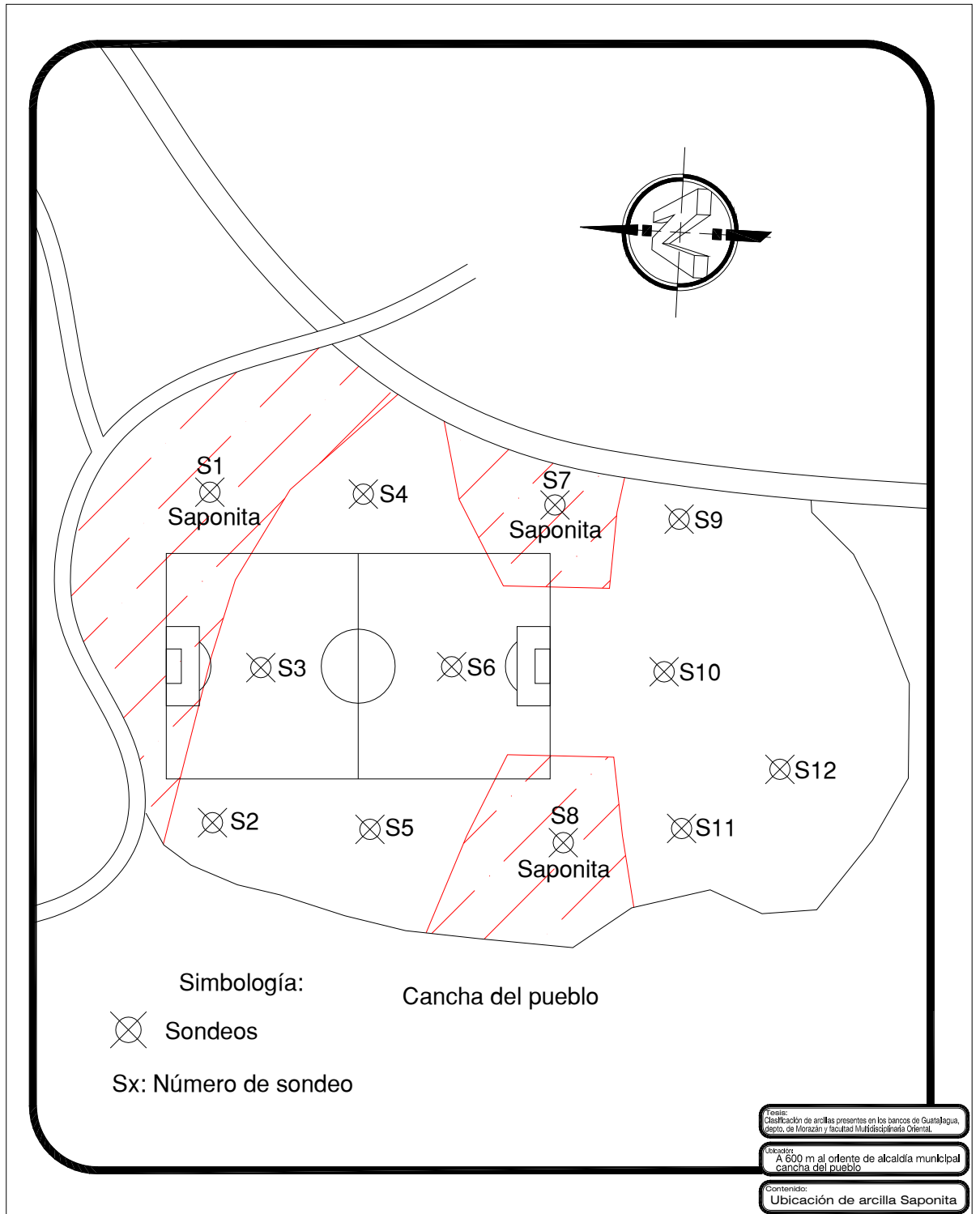


Figura 5.2.2.1: Saponita encontrada en banco de Guatajiagua.

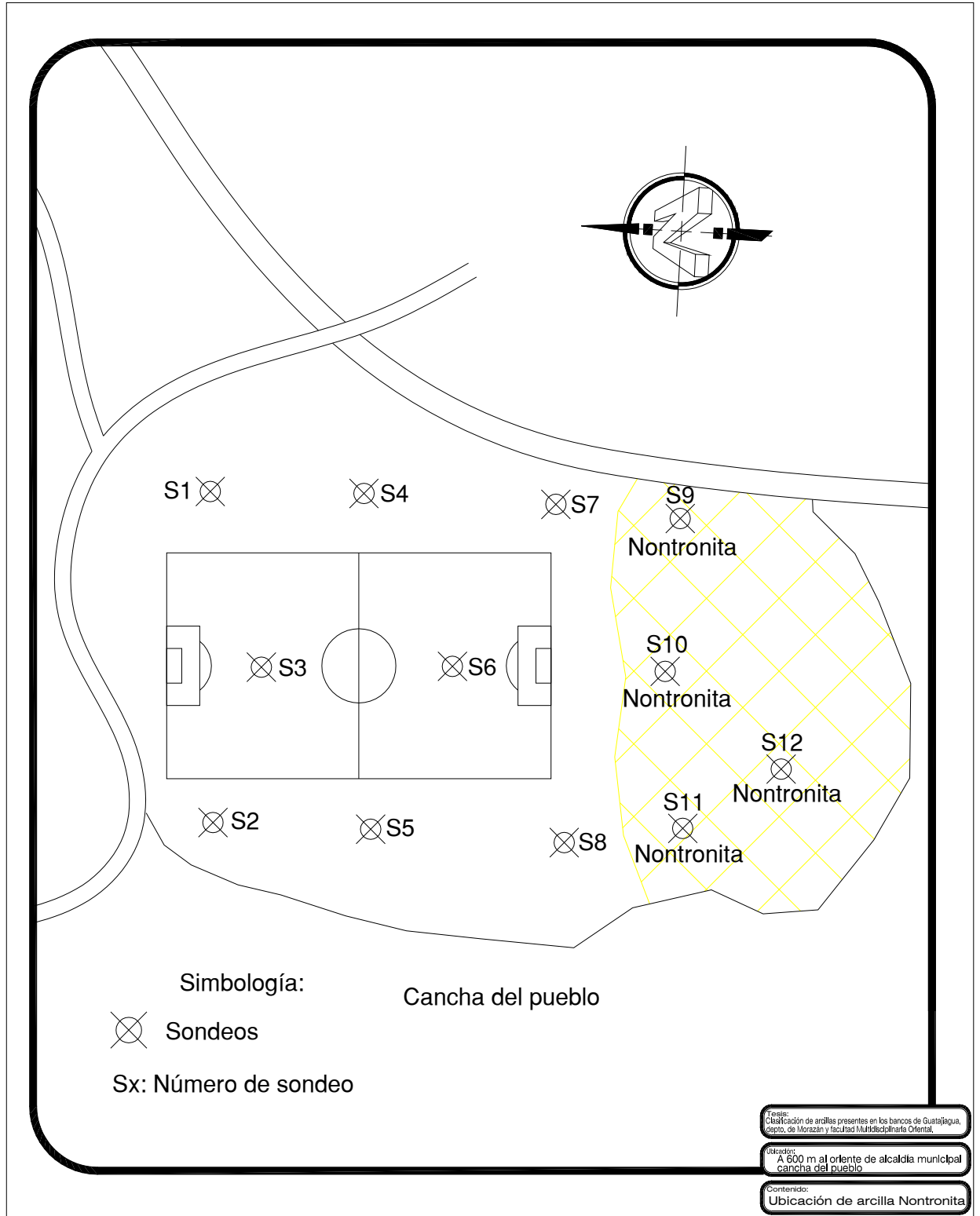


Figura 5.2.2.2: Nontronita encontrada en banco de Guatajagua.

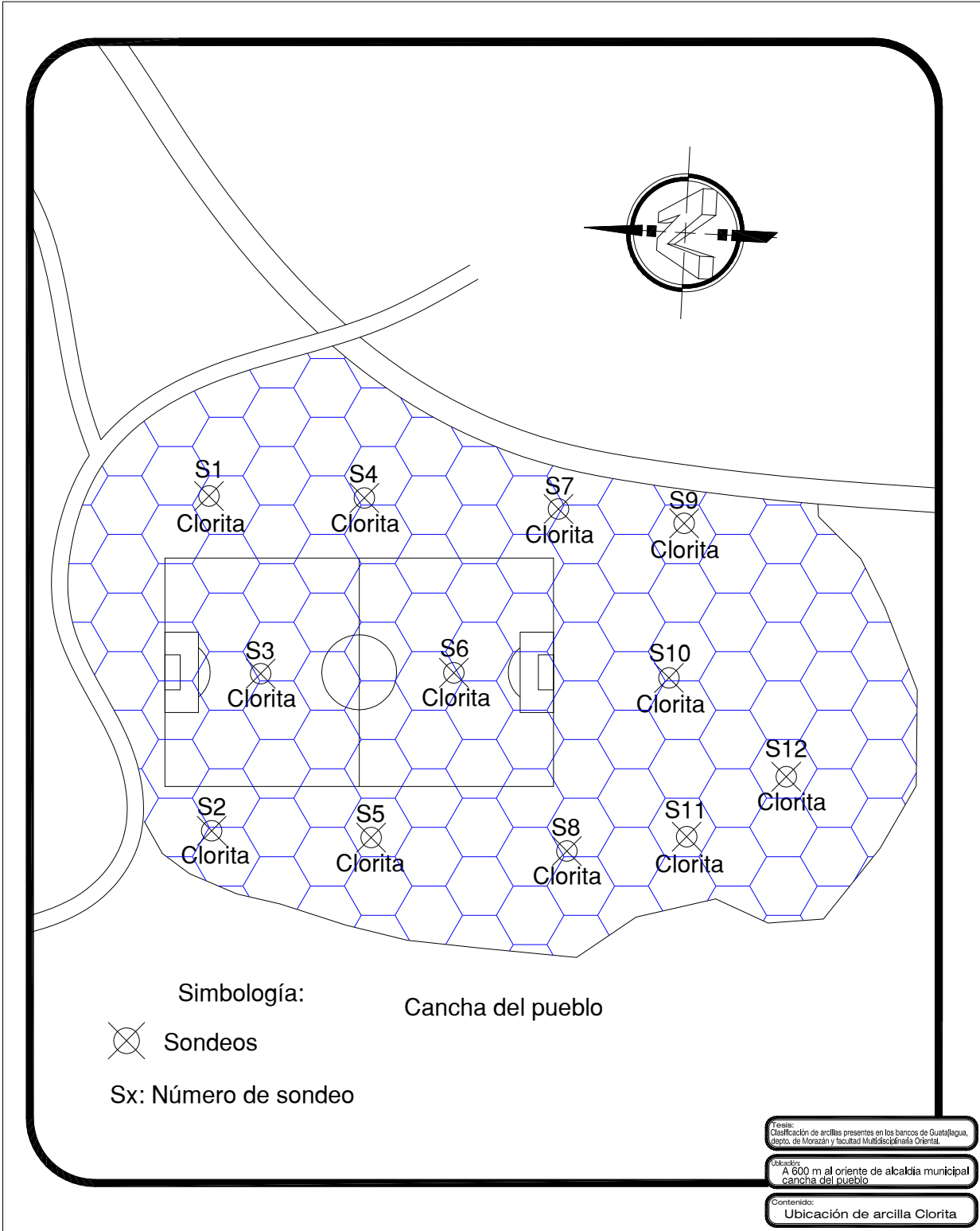


Figura 5.2.2.4: Clorita encontrada en banco de Guatajiagua.

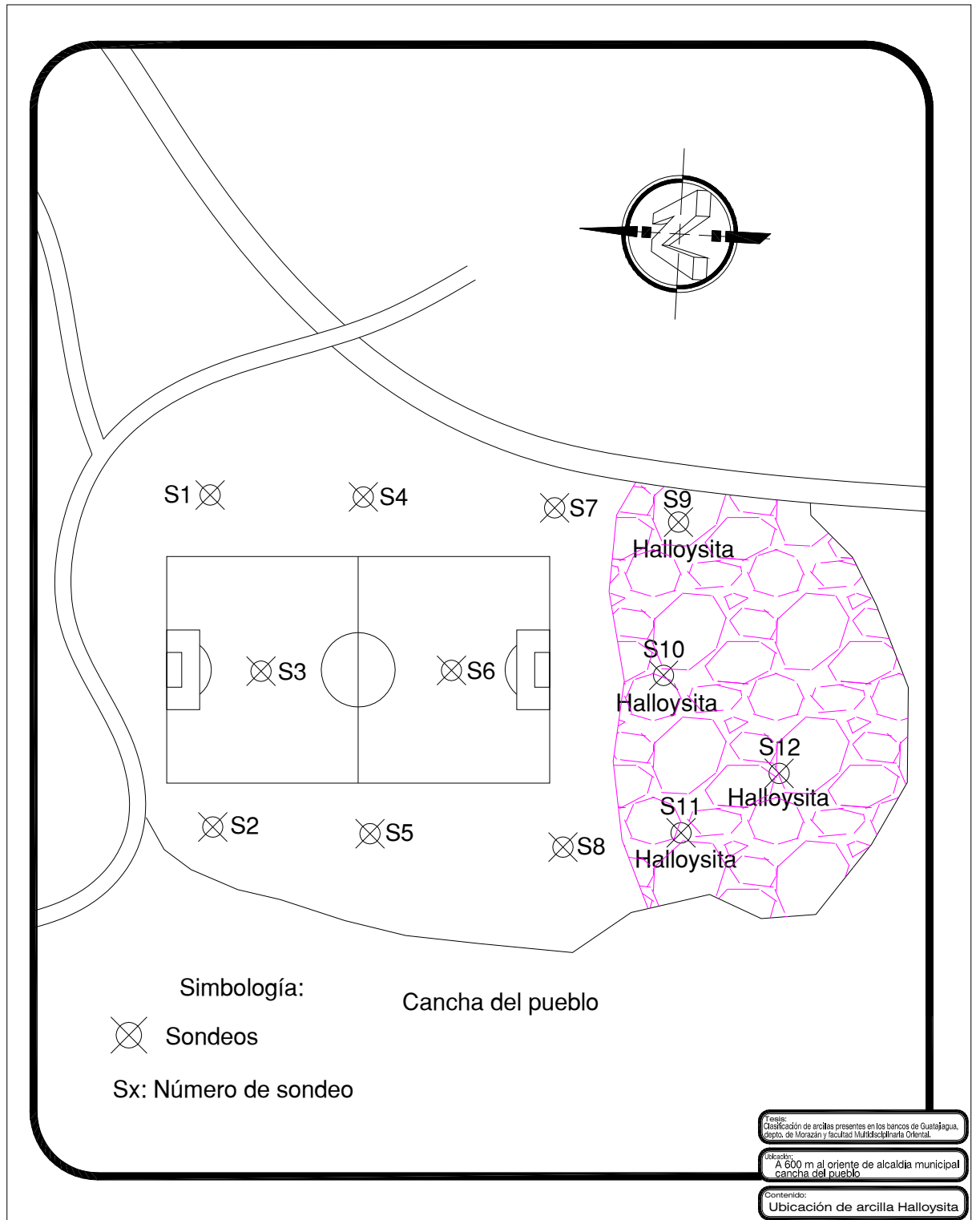


Figura 5.2.2.5: Halloysita encontrada en banco de Guatajiagua.

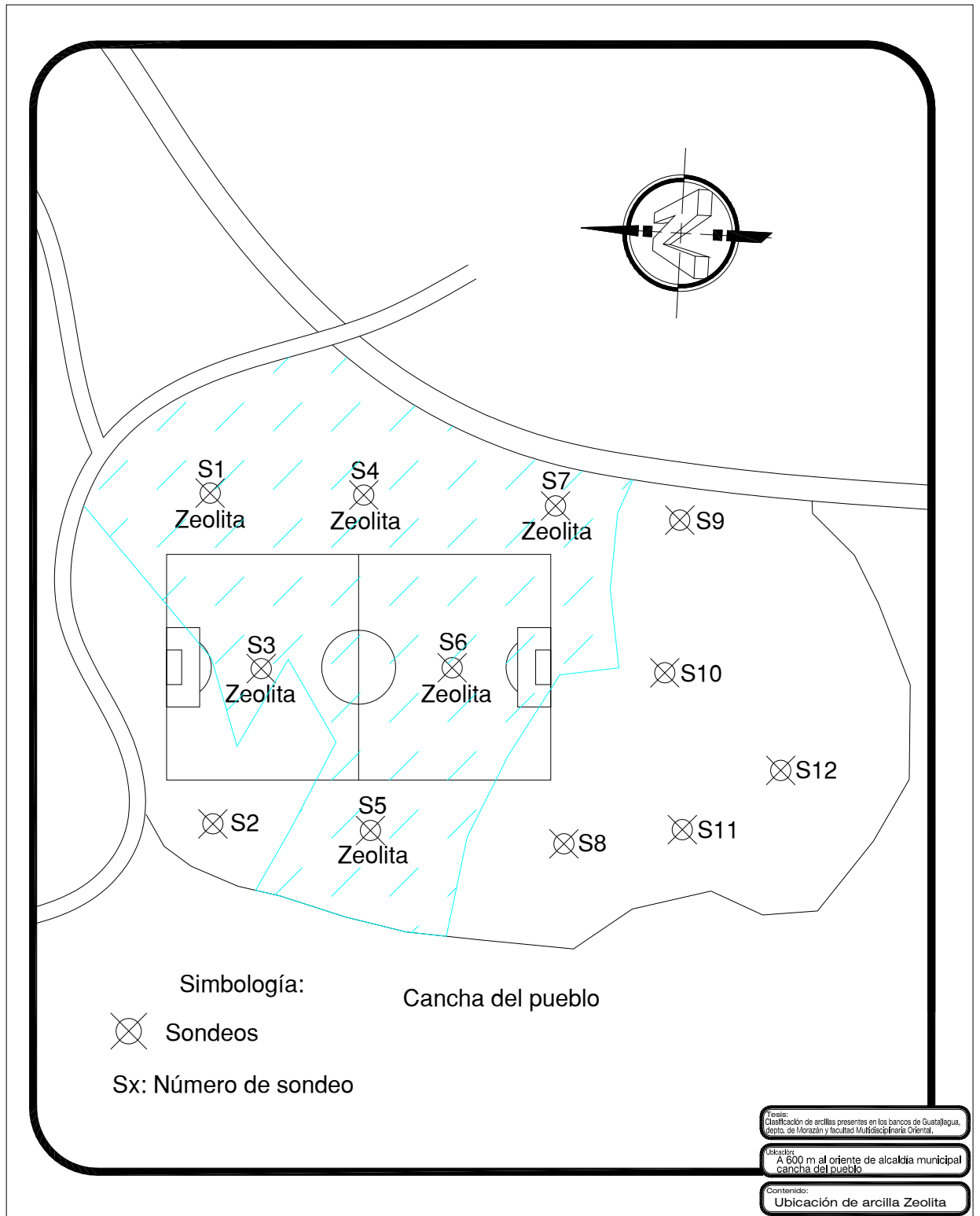


Figura 5.2.2.6: Zeolita encontrada en banco de Guatajiagua.

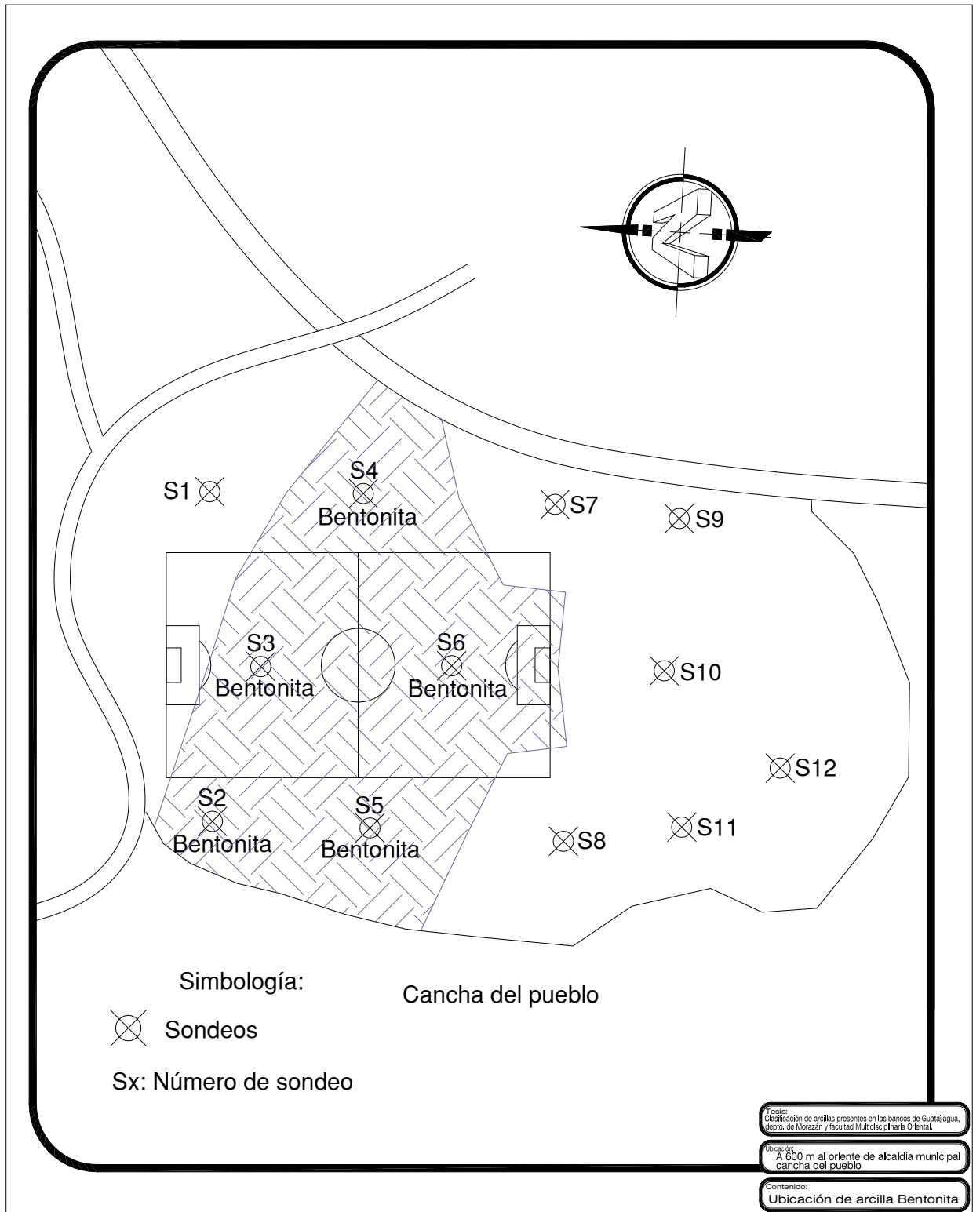


Figura 5.2.2.7: Bentonita encontrada en banco de Guatajiagua.

5.2.3 Descripción de los minerales arcillosos

A continuación se hace una breve descripción de los principales minerales arcillosos que fueron identificados por medio de Difracción de rayos "X" y algunos que por su importancia no podíamos dejarlos afuera:

5.2.3.1 Grupo de las Esmectitas.

Su nombre deriva de un término griego que significa "que limpia"; las variaciones químicas, dentro de una estructura similar, diferencian a este grupo de minerales que conservan una serie de propiedades comunes, y que es conocido como grupo de las esmectitas o montmorillonitas. La fórmula básica de este grupo es $Al_4Si_8O_{20}$ o $(OH)_4 \cdot nH_2O$. Este grupo incluye especies dioctaédricas como la montmorillonita, la nontronita, la beidelita y trioctaédricas como la sauconita, la saponita y la hectorita.

Casi siempre estos minerales están formados por partículas de tamaño muy pequeño (100-200 Å), siendo minerales expansibles. La admisión de moléculas polares entre capas, determina una expansión con respecto a uno de los ejes en su estructura, dicha expansión esta en función del tamaño de la molécula introducida.

Son minerales con una elevada capacidad de intercambio cationico, debido a que existe una deficiencia de carga positiva o exceso de carga negativa.

Las esmectitas son importantes minerales de suelos (a diferencia de la saponita y la hectorita que son constituyentes raros). Se encuentran en depósitos sedimentarios, metamórficos y de origen hidrotermal. Su uso está muy extendido en la industria como agente gelificante, también se utiliza como tapones en suelos y diques.

5.2.3.1.1 Grupo Esmectitas Dioctaédricas

Montmorillonita

El nombre montmorillonita proviene de que el material fue descrito en la localidad de Montmorillon, Vienne, Francia, por Damour y Salvetat en el año de 1,847. La montmorillonita se presenta en forma de masas compactas, de color gris, blanco, teñido y a veces con coloraciones marrones, verdosas o amarillentas. Es una arcilla muy pegajosa y plástica, su densidad varía desde 1.6 a 2.7 g/ml, dependiendo del grado de saturación en el que se encuentre.

La distancia entre aristas de las unidades de la montmorillonita puede variar entre 9.6 y 18.0 Å y con ello la distancia interlaminar varía entre 2.5 y 15.0 Å. Esto permite la acumulación de agua de hidratación y de otros elementos hidratados (capacidad interna de expansión) entre los paquetes. Al mismo tiempo se pueden acumular entre los paquetes iones de elementos alcalinos y alcalinotérreos. Algunas veces la acumulación lleva a una distancia entre

paquetes mayor de 28 Å produciéndose la ruptura del mineral, posee además una elevada capacidad de intercambio cationico.

La montmorillonita se forma principalmente por alteración de rocas eruptivas básicas, tobas volcánicas y cineritas.

Nontronita

Generalmente la Nontronita tiene una coloración amarillo verdosa, o parduzca. Entre sus propiedades físicas podemos mencionar que posee una dureza de 2.0 a 2.5 y una densidad de 1.7 a 1.9 g/ml, aproximadamente. La nontronita es un mineral que contiene una gran cantidad de hierro, el cual puede alcanzar hasta cerca del 30 %, el cual muchas veces substituye a otros elementos, por ejemplo puede darse una substitución casi completa del Al octaédrico por Fe férrico y además, substitución casi parcial de Si por Al o Fe en las hojas tetraédricas. Dicha introducción de hierro distorsiona y debilita la red.

Vermiculitas

Su nombre procede del término latín "vermiculatos", que significa vermiforme o con forma de gusano, en relación con el aspecto de gusano en movimiento que adquieren las láminas cuando se calientan. La vermiculita es un mineral arcilloso importante que se encuentran en suelos y sedimentos, y generalmente se deriva de micas, formándose muchas veces en condiciones hidrotermales y

por alteración de cristales de biotita o flogopita y minerales como serpentinas, talco, algunos feldespatos, inosilicatos o cloritas e illitas. Este tipo de mineral arcilloso generalmente se presenta como cristales de gran tamaño o masas de aspecto semejante a las micas, pero son más quebradizas, además presentan propiedades plásticas. Las arcillas en las que abunda este mineral presentan un fuerte carácter electronegativo. La vermiculita es caracterizada porque posee una gran expandibilidad. El espacio entre las aristas varía dependiendo del ion predominante en el intercambio de a cuerdo a que si el ion es divalente, el espacio puede llegar a ser hasta de 15 Å; en los iones monovalentes como el potasio, es de 10.6 Å. Además tiene una capacidad de intercambio catiónico elevada (100-150 mg/100g). Se utiliza como sustrato en cultivos hidropónicos, como aislante térmico y acústico, así como en la industria farmacéutica como excipiente de medicamentos.

Se diferencia de las montmorillonitas en que al ser tratada con moléculas orgánicas polares, como glicerol o glicol etilénico, no se expande más allá de 15 Å, en cambio la montmorillonita se expande a 17.6-17.1 Å respectivamente.

Beidelita

Es un mineral relativamente frecuente entre los suelos y sedimentos. Se origina al igual que las montmorillonitas, principalmente por meteorización en ambiente

básico de rocas volcánicas básicas y cenizas volcánicas. Frecuentemente las bentonitas contienen apreciables cantidades de beidelita.

5.2.3.1.2 Grupo Esmectitas Trioctaédricas

Saponita

Su nombre deriva de la palabra griega σαπω = sapos, el cual a su vez significa jabón. La saponita se puede encontrar formada por agregados de color gris-blanco o teñidos de marrón. Entre sus propiedades físicas se pueden mencionar que posee una dureza de 1.5 y una densidad que puede variar en el intervalo de 2.3 a 2.4 g/ml.

La saponita se forma preferentemente en ambientes hidrotermales, como producto de la alteración de las serpentinas. Se pueden encontrar rellenando fisuras o huecos. Cabe mencionar que la saponita no es un mineral muy común en suelos y que su presencia implica que el mineral se preformo en otro ambiente.

Hectorita

La hectorita es una esmectita trioctaédrica que no contiene aluminio ya que este se encuentra reemplazado por Mg, y éste a su vez por algo de Li. Su nombre

proviene del lugar Hector, California. Es de coloración blanco amarillenta, posee una capacidad de intercambio catiónico que puede alcanzar alrededor de 80 mg/100g.

Generalmente su formación está relacionada a actividad hidrotermal o alteración de cenizas volcánicas con alto contenido de vidrios. Su importancia como mineral de suelos es limitada.

Bentonita

Son arcillas del grupo de las esmectitas que se originan como producto de una desvitrificación de cenizas volcánicas. Usualmente cuando la montmorillonita se origina por la alteración de cenizas volcánicas se le conoce como bentonita. También se origina a partir de la meteorización de las micas.

5.2.3.2 Grupo Cloritas.

Cloritas

Las cloritas constituyen un grupo de minerales cuyo nombre se deriva del termino griego chlorós, el cual significa verde, esto se debe al color verde predominante en muchos de estos minerales. Las cloritas tienen una amplia distribución entre las rocas metamórficas, siendo un mineral característico de los esquistos verdes. Las cloritas son constituyentes ocasionales de las rocas

ígneas, en las cuales se originan en forma secundaria por alteración hidrotermal o deutérica. Como residuo de meteorización, las cloritas se encuentran en muchos suelos. Se pueden encontrar en suelos provenientes de rocas máficas y abundantes en serpentina. La clorita es un mineral interestratificado regularmente a base de capas alternadas de mica y brucita. La distancia entre aristas de una unidad elemental puede variar entre 14.1 y 14.3 Å; en caso de cloritas expandibles puede llegar a ser de 18 Å.

Montmorillonita – Clorita (interestratificadas)

En este caso se identificó un mineral compuesto por Montmorillonita–Clorita interestratificadas, es decir, una mezcla de capas de montmorillonita y clorita. Los minerales interestratificados son aquellos cuyos cristales individuales están constituidos por celdas o capas unitarias de dos o más tipos. Su importancia dentro de los minerales de arcilla de suelo es muy grande, y es probable que una parte considerable de las arcillas de suelos esté compuesta por interestratificados de variada composición. La interestratificación en este tipo de minerales se debe a que en los filosilicatos las unidades básicas de caolinita, halloysita, vermiculita, y en nuestro caso clorita y montmorillonita, tienen en común, o muy próximas, las dimensiones de sus celdas elementales, de modo que es permisible una intercalación a lo largo de uno de sus ejes, en superposición paralela.

5.2.3.3 Grupo Caolinitas

Este grupo de minerales son probablemente, el grupo de minerales de arcilla de mayor expansión y frecuencia en los suelos del mundo. Constan de especies dioctaédricas y trioctaédricas. Los primeros están representados básicamente por cuatro especies polimórficas: dickita, nacrita, caolinita y halloysita. Incluye, además, una especie altamente desordenada conocida como Fire-clay, que corresponde a una forma imperfecta de caolinita. El segundo grupo, conocidos como serpentinas, son minerales con mucha analogía estructural a los caolines, entre ellos podemos mencionar el crisolito, lizardita y antigorita, minerales poco frecuentes en suelos.

Caolinita

El origen de este nombre deriva de "caolín" que es una deformación de "Kauling" monte ubicado en China de donde se extraía este mineral cerca de la región de "Jauchu Fa". La caolinita se presenta en forma de partículas muy finas con tamaño generalmente inferior a 1 μ , de coloración blanca o ligeramente perlada. En forma de agregados, se presenta con característica de masas vermiformes, fácilmente exfoliables. Posee una densidad variable entre 2.5-2.6 g/ml y un índice de dureza de 2.6. Generalmente es un derivado de los Feldespatos ortosa y albita. Tiene un alto grado de estabilidad y es muy frecuente encontrarla en suelos y sedimentos, usualmente producto de la descomposición de las rocas o de acciones hidrotermales (suelos altamente

meteorizados), como en muchos suelos en las zonas tropicales. No es expandible y presenta baja capacidad de intercambio de cationes (5-15 mg/100g) dado que pocas veces presenta cambio isomórfico, lo que explica la baja fertilidad que tienen los suelos con proporciones elevadas de este grupo de minerales. Este mineral presenta propiedades plásticas que son influidas por los cationes de cambio. Además presenta un espacio entre planos similares de los paquetes laminares de 7.2 Å, mientras que el espacio interlaminar es sólo de 2.7 Å. La Caolinita puede presentar algunas formas isómeras, es decir que puede poseer la misma composición química pero presentar diferentes propiedades: la dickita de un mejor grado de cristalización y la nacrita de bajo grado de cristalización, aunque en realidad son poco conocidas.

Dickita

La dickita es una especie monoclinica, de estructura semejante a la caolinita, pero diferente en cuanto al orden de apilamiento de las capas estructurales. Su importancia como mineral de arcillas de suelos es muy restringida y se considera una rareza. Su formación parece estar ligada a procesos hidrotermales, ya que se le ha encontrado asociada con cuarzo fluorita y sulfuros hidrotermales. Generalmente la dickita se presenta como cristales de color blanco, o parcialmente coloreado de marrón o amarillo. Los cristales pueden adquirir dimensiones megascópicas, de 2.5 a 8 µ (a veces hasta 1 mm);

tiene forma de agregados, generalmente son de tipo vermiforme. La dureza tiene un índice de 2.5 y la densidad es de 2.6 g/ml.

Nacrita (Politipo de la Caolinita)

Al igual que la dickita, la nacrita es un mineral sumamente raro entre los minerales de arcilla de suelos. De origen hidrotermal, se le describe en asociación con tobas porfíricas en asociación a criolita y micas. Su estructura y composición son similares a la dickita, pero se diferencia en cuanto al número de capas que constituyen la celda elemental.

Este tipo de mineral corresponde a un politipo de la caolinita.

La nacrita se presenta en forma de masas escamosas, exfoliables, pudiendo desarrollar cristales hasta de 5 mm, de diseño hexagonal. La dureza es de alrededor de 2.0 y su densidad llega a 2.6 g/ml.

Halloysita (hidratada)

Es una forma hidratada de la caolinita. Su nombre proviene o se deriva de su descubridor, O. de Halloy. Son muy frecuentes en suelos derivados de cenizas volcánicas y presentan productos de meteorización de arcillas amorfas como la alófana. Su origen es más bien a partir de la plagioclasa. Puede poseer hasta cuatro moléculas de agua de hidratación. Generalmente las halloysitas se presentan constituyendo masas blancas, a veces teñidas de marrón o amarillo, con dureza de 1 ó 2 y una densidad alrededor de 2.2 g/ml. En la halloysita

hidratada la capacidad de intercambio cationico alcanza un valor que varía de 10-50 mg/100g.

Al elevarse la temperatura a más de 105 °C pierde el agua de hidratación pasando a la caolinita. La halloysita con ese grado máximo de hidratación, se llama endelita y se caracteriza porque la distancia entre sus aristas aumenta de 2.7 a 10.1 Å. Así es factible que la endelita fije potasio, amonio y otros elementos. Una forma menos hidratada recibe el nombre de metahalosita. Otras formas menos conocidas de este grupo son la serpentina, la antigorita, la lizardita y la amesita.

5.2.3.4 Grupo de las Illitas.

Illita

Las Illitas se derivan generalmente de las micas como la moscovita, aunque contienen menos potasio y más agua de hidratación, por lo que se denomina mica hidratada. Otra de sus principales características es la de tener una mayor capacidad de intercambio iónico, es decir una mayor posibilidad de retener y liberar iones que pueden ser utilizados por las plantas para su alimento. La Illita posee una distancia entre planos similares de paquetes unitarios de aproximadamente 10 Å y una distancia interlaminar de 3.5 Å. Además presenta cierta facilidad para la fijación de potasio y amonio. La Illita es una arcilla no

expandible, con una capacidad de intercambio intermedia (10 – 50 mg/100 g arcilla), además posee una densidad que varía de 2.6 a 2.7 g/ml.

Zeolitas

Las zeolitas son aluminosilicatos que incluyen en su composición elementos alcalinos y alcalino. Su característica más notable es la posibilidad de absorber agua en forma reversible y exhibir una fuerte capacidad de intercambio de cationes. Se encuentran con frecuencia, rellenando cavidades, grietas o fisuras de rocas volcánicas básicas y a menudo se les encuentra en ambientes hidrotermales.

5.3 Estados de consistencia de los suelos: Ensayo de límites de plasticidad o límites de consistencia.

Los límites líquido, plástico y de contracción fueron determinados en el capítulo anterior por medio de pruebas de laboratorio (ver sección 4.2.1, 4.2.2 y 4.2.3) y con la ayuda de una hoja de cálculo se obtuvo las humedades correspondientes en dichos límites. Ahora trabajaremos con dichos resultados para clasificar el suelo arcilloso en estudio.

En la sección 2.3 se estableció que Arthur Casagrande definió como índice de plasticidad a la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico (ver sección 2.3); estudió la relación que existe entre el límite líquido y el índice de plasticidad con diversas muestras de suelos arcillosos y con base a los resultados obtenidos, propuso una carta de plasticidad para la clasificación de los suelos (ver figura 2.4.13).

En las tablas 5.3.1 y 5.3.2 se han resumido los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio practicadas a las arcillas presentes en los bancos de Guatajiagua y San Miguel respectivamente, ya que para realizar el estudio se tomaron 20 muestras alteradas en campo para San Miguel y 12 muestras alteradas para Guatajiagua (ver sección 3.2.2); a las que se le practicaron 45 ensayos para cada muestra en estudio y para cada límite respectivamente (45 ensayos para límite líquido, 45 para límite plástico y 45 para límite de contracción por muestra).

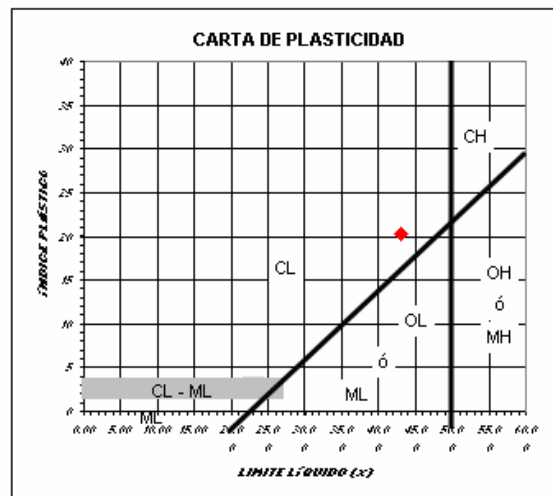
CLASIFICACIÓN DE ARCILLA PERTENECIENTE A GUATAJAGUA DEPARTAMENTO DE MORAZAN

No	LL (%)	No	LL (%)	No	LL (%)	No	LL (%)
LÍMITE LÍQUIDO							
1	45.99	6	45.55	11	44.89		
2	43.32	7	40.76	12	41.24		
3	40.07	8	41.45				
4	44.21	9	41.87				
5	43.11	10	43.88				

Valores Promedio	
L.L. (%)=	43.0
L.P. (%)=	22.8
I.P. (%)=	20.3
L.C. (%)=	12.1

No	LP (%)	No	LP (%)	No	LP (%)	No	LP (%)
LÍMITE PLÁSTICO							
1	20.56	6	22.18	11	21.06		
2	21.56	7	20.62	12	20.56		
3	22.62	8	28.56				
4	22.87	9	23.71				
5	26.98	10	22.06				

No	LC (%)	No	LC (%)	No	LC (%)	No	LC (%)
CONTRACCIÓN LINEAL							
1	13.08	6	12.79	11	11.28		
2	12.73	7	11.83	12	12.41		
3	11.82	8	12.41				
4	12.04	9	12.91				
5	11.06	10	11.31				



CLASIFICACIÓN SUCS: CL

Tabla 5.3.1: Tabla resumen límite líquido, límite plástico, límite de contracción y carta de plasticidad para banco de Guatajiagua

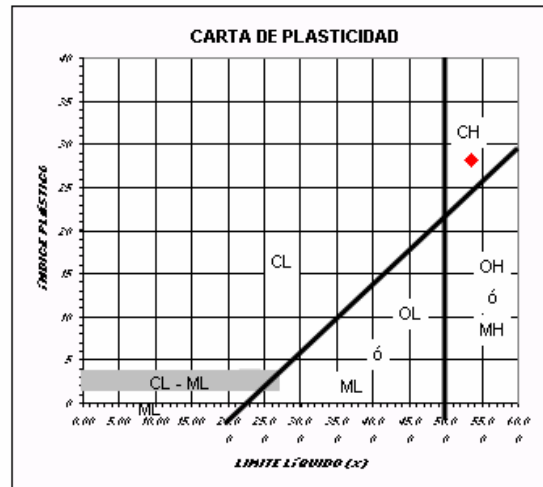
CLASIFICACIÓN DE ARCILLA PERTENECIENTE A FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE ORIENTE

No	LL (%)	No	LL (%)	No	LL (%)	No	LL (%)
LÍMITE LÍQUIDO							
1	45.67	6	53.23	11	55.67	16	53.70
2	53.24	7	53.80	12	53.80	17	54.93
3	54.48	8	52.94	13	55.71	18	55.46
4	54.18	9	52.85	14	54.39	19	55.14
5	48.17	10	53.00	15	55.18	20	55.60

Valores promedio	
L.L. (%)=	53.6
L.P. (%)=	25.4
I.P. (%)=	28.2
L.C. (%)=	10.7

No	LP (%)	No	LP (%)	No	LP (%)	No	LP (%)
LÍMITE PLÁSTICO							
1	23.83	6	25.07	11	25.56	16	24.23
2	26.50	7	26.04	12	25.69	17	24.26
3	27.11	8	25.33	13	25.17	18	25.64
4	27.28	9	25.07	14	25.33	19	25.03
5	23.89	10	24.69	15	25.06	20	26.88

No	LC (%)	No	LC (%)	No	LC (%)	No	LC (%)
CONTRACCIÓN LINEAL							
1	10.11	6	9.53	11	9.00	16	11.99
2	9.05	7	11.04	12	11.84	17	9.38
3	12.00	8	13.04	13	10.05	18	10.59
4	8.97	9	12.95	14	9.84	19	9.81
5	11.53	10	11.41	15	11.49	20	11.29



CLASIFICACIÓN SUCS: CH

Tabla 5.3.2: Tabla resumen límite líquido, límite plástico, límite de contracción y carta de plasticidad para banco de San Miguel

La información que hemos obtenido de los valores de los Límites Líquidos e Índices de Plasticidad del suelo en estudio (carta de plasticidad en tabla 5.3.1 y tabla 5.3.2), permite clasificarlo en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.) como un suelo CH (Arcilla Inorgánica de Alta Plasticidad), para el caso del banco de San Miguel, y suelo CL (Arcilla Inorgánica de Plasticidad media) para el banco de Guatajiagua.

Los Límites de Consistencia se encuentran dentro los siguientes rangos:

Para San Miguel: Límite Líquido entre 45.67% y 55.71%, Límite Plástico entre 23.83% y 27.28%, Límite de Contracción entre 8.97% y 13.04%.

Para Guatajiagua: Límite Líquido entre 40.07% y 45.99%, Límite Plástico entre 20.56% y 28.56%, Límite de Contracción entre 11.06% y 13.08%.

Los valores en los Límites Líquidos con relación al Índice de Plasticidad se debe precisamente a los altos contenidos de arcilla presentes, definiendo que la Arcilla es altamente plástica para San Miguel, y medianamente plástica para Guatajiagua.

El Índice de Plasticidad indica el rango de humedades para el cual éstas Arcillas presentan una consistencia plástica, y que puede presentarse a partir de

cualquier contenido de humedad igual o superior al rango establecido por el Límite Plástico, e inferior al rango establecido por el Límite Líquido.

Los valores del Límite de Contracción indican el porcentaje de humedad a partir del cual la Arcilla ya no presenta contracción apreciable de volumen al ir perdiendo humedad, esto nos dice que los cambios de volumen debido a la variación en el contenido de humedad se presentan a partir de este valor en adelante, definiendo así que los suelos en los bancos de San Miguel y Guatajiagua son vulnerables a las variaciones de volumen casi para cualquier cambio en su estado de humedad.

El proceso de contracción generado por la pérdida de humedad en el suelo da lugar a que se formen grietas de contracción; estas grietas se observaron sobre la superficie del suelo, tanto en el banco de San Miguel, como en el banco de Guatajiagua (Ver figura 3.2.1.4).

5.4 Correlación de resultados prueba de Difracción de Rayos “X” y Límites de Consistencia.

Para poder realizar la correlación de datos para las pruebas de Difracción de Rayos “X” y Límites de Consistencia, tomaremos de parámetro la plasticidad de dichos minerales arcillosos. Por una parte tenemos la expansión de las

muestras ensayadas por Difracción de Rayos “X”, cuando estas se ensayan secadas al aire vrs las muestras saturadas con glicol; y por el lado de los Límites de Consistencia, tenemos el Índice Líquido.

Como podemos ver en la carta de plasticidad (ver figura 2.4.13), las arcillas altamente y medianamente plásticas, son separadas por un límite líquido mayor ó menor a 50% respectivamente.

Ambos parámetros se encuentran en la tabla 5.4.1 para el banco de Guatajiagua y tabla 5.4.2 para el banco de San Miguel.

BANCO DE GUATAJIAGUA

No	Distancia interplanar en muestra secada al aire (Å)	Distancia interplanar en muestra saturada con glicol (Å)	Expansión observada (Å)	Límite Líquido promedio por ensayo (%)
MUESTRA No1				
1	20.37	21.99	1.62	45.99
2	15.72	17.91	2.19	45.99
3	4.46	4.46	0.00	45.99
MUESTRA No2				
4	20.77	21.82	1.05	43.32
5	17.09	17.97	0.88	43.32

6	7.36	7.36	0.00	43.32
7	4.47	4.47	0.00	43.32
MUESTRA No3				
8	15.58	18.03	2.45	40.07
9	7.28	7.28	0.00	40.07
10	4.45	4.45	0.00	40.07
MUESTRA No4				
11	16.15	18.28	2.13	44.21
12	7.26	7.31	0.05	44.21
13	4.47	4.47	0.00	44.21
MUESTRA No5				
14	15.67	17.61	1.94	43.11
15	9.09	9.10	0.01	43.11
16	4.46	4.46	0.00	43.11
MUESTRA No6				
17	16.45	18.87	2.42	45.55
18	7.24	7.33	0.09	45.55
19	4.47	4.47	0.00	45.55
MUESTRA No7				
20	21.19	22.09	0.90	40.76
21	7.18	7.23	0.05	40.76
22	4.45	4.45	0.00	40.76
MUESTRA No8				
23	21.45	21.71	0.26	41.45
24	7.26	7.18	-0.08	41.45

25	4.45	4.45	0.00	41.45
MUESTRA No9				
26	20.94	22.07	1.13	41.87
27	9.60	10.77	1.17	41.87
28	7.22	7.22	0.00	41.87
29	4.45	4.45	0.00	41.87
MUESTRA No10				
30	20.61	21.82	1.21	43.88
31	7.21	7.21	0.00	43.88
32	4.45	4.45	0.00	43.88
MUESTRA No11				
33	21.27	22.07	0.80	44.89
34	7.19	7.19	0.00	44.89
35	4.45	4.45	0.00	44.89
MUESTRA No12				
36	21.53	21.53	0.00	41.24
37	7.17	7.22	0.05	41.24
38	4.45	4.45	0.00	41.24

Tabla 5.4.1: Expansión observada de muestras secadas al aire vrs saturadas con glicol y Límite líquido para el banco de Guatajiagua.

Para el caso de Guatajiagua la clasificación S.U.C.S. del suelo es de una arcilla inorgánica de mediana plasticidad, teniéndose expansiones observadas hasta de 2.45 Å (Ver muestra 3 de tabla 5.4.1); con un Límite Líquido promedio de 43.00%

BANCO DE SAN MIGUEL

No	Distancia interplanar en muestra secada al aire (Å)	Distancia interplanar en muestra saturada con glicol (Å)	Expansión observada (Å)	Límite Líquido promedio por ensayo (%)
MUESTRA No1				
1	17.35	19.27	1.92	45.67
2	4.47	4.47	0.00	45.67
MUESTRA No2				
3	18.22	18.93	0.71	53.24
4	7.47	7.99	0.52	53.24
5	4.48	4.48	0.00	53.24
MUESTRA No3				
6	17.67	18.98	1.31	54.48
7	4.45	4.45	0.00	54.48
MUESTRA No4				
8	16.89	18.80	1.91	54.18
9	7.45	7.88	0.43	54.18
10	4.47	4.47	0.00	54.18
MUESTRA No5				
11	4.48	4.48	0.00	48.17
MUESTRA No6				
12	16.82	19.48	2.66	53.23
13	7.49	7.94	0.45	53.23

14	4.46	4.46	0.00	53.23
MUESTRA No7				
15	16.99	18.99	2.00	53.80
16	6.43	6.50	0.07	53.80
17	4.45	4.45	0.00	53.80
MUESTRA No8				
18	16.51	18.03	1.52	52.94
19	7.60	7.66	0.06	52.94
20	6.47	6.47	0.00	52.94
21	4.45	4.45	0.00	52.94
MUESTRA No9				
22	16.02	18.08	2.06	52.85
23	6.46	7.37	0.91	52.85
24	4.45	4.45	0.00	53.60
MUESTRA No10				
25	17.05	17.66	0.61	53.00
26	7.46	8.01	0.55	53.00
27	4.45	4.45	0.00	53.00
MUESTRA No11				
28	16.26	18.27	2.01	55.67
29	7.48	7.69	0.21	55.67
30	4.45	4.45	0.00	55.67
MUESTRA No12				
31	16.62	16.93	0.31	53.80

32	7.34	7.35	0.01	53.80
33	4.45	4.45	0.00	53.80
MUESTRA No13				
34	17.32	18.33	1.01	55.71
35	7.73	7.82	0.09	55.71
36	4.45	4.45	0.00	55.71
MUESTRA No14				
37	16.66	16.82	0.16	54.39
38	7.44	7.47	0.03	54.39
39	4.45	4.45	0.00	54.39
MUESTRA No15				
40	10.81	18.48	7.67	55.18
41	4.91	7.77	2.86	55.18
42	4.45	4.45	0.00	55.18
MUESTRA No16				
43	15.72	18.52	2.80	53.70
44	8.00	8.39	0.39	53.70
45	4.48	4.48	0.00	53.70
MUESTRA No17				
46	17.31	19.26	1.95	54.93
47	7.14	7.92	0.78	54.93
48	4.45	4.45	0.00	54.93
MUESTRA No18				
49	15.96	16.10	0.14	55.46

50	4.45	4.45	0.00	55.46
MUESTRA No19				
51	16.87	17.26	0.39	55.14
52	7.64	7.91	0.27	55.14
53	4.45	4.45	0.00	55.14
MUESTRA No20				
54	15.40	17.26	1.86	55.60
55	4.45	4.45	0.00	55.60

Tabla 5.4.2: Expansión observada de muestras secadas al aire vrs saturadas con glicol y

Límite Líquido para el banco de San Miguel.

Para el banco de San Miguel la clasificación S.U.C.S. del suelo es de una arcilla inorgánica de alta plasticidad, observándose expansiones de hasta 7.67 Å (Ver muestra 15 de tabla 5.4.2); con un Límite Líquido promedio de 53.60%.

CONCLUSIONES.

- La identificación de los minerales arcillosos por medio de la prueba de difracción de Rayos “X”, nos demostró ser muy confiable, ya que de cada banco obtuvimos difractogramas bastante similares, identificando y ubicando los mismos minerales en zonas específicas, las cuales presentan características propias de dichos minerales, gracias a esto nos fue posible zonificar los bancos (ver capítulo 5.2.2).
- La gran mayoría de minerales arcillosos encontrados en el banco de San Miguel corresponden al grupo de las esmectitas (Saponita, Nontronita y Montmorillonita), y los demás pertenecen al grupo de las cloritas (clorita, montmorillonita-clorita) y las caolinitas (halloysita).
- Los minerales no arcillosos encontrados en el banco de San Miguel fueron Labradorita y Cuarzo.
- De la muestra tomada en campo para el banco de San Miguel (20 sondeos), se obtuvo que se encuentra constituida por un 18% de Saponita, 4% de Nontronita, 11% Montmorillonita, 13% Montmorillonita – Clorita (interestratificada), 9% Clorita, 7% Halloysita, 19% Labradorita y

19% Cuarzo, predominando los minerales arcillosos con alta plasticidad, que dan al suelo sus características.

- De acuerdo a los planos de zonificación, se puede apreciar que los minerales con alta plasticidad están situados principalmente en la zona Oeste del campus Universitario, específicamente en donde se encuentra ubicado el departamento de medicina.
- Al mismo tiempo los minerales con menor plasticidad (clorita y la halloysita), fueron identificados en la zona Este del campus Universitario.
- Se definen dos principales zonas con diferentes plasticidades para el banco de San Miguel, la más plástica en la zona Oeste y la de menor plasticidad en la zona Este.
- Los resultados indican que desde el punto de vista agrícola y de acuerdo a los tipos de minerales arcillosos que se identificaron; para el banco de San Miguel la zona que podría dar mejores resultados es la zona oeste,

ya que los minerales arcillosos predominantes en esa área son del grupo de las esmectitas,

- Los valores del límite líquido para el banco de San Miguel oscilaron entre los porcentajes de humedades de 45.7% y 55.7%, con lo que podemos decir que para humedades con un porcentaje mayor en este suelo, se tendrá pérdida de su cohesión y se deformará con esfuerzos muy pequeños.
- Los porcentajes de las humedades para el límite plástico para el banco de San Miguel variaron dentro del rango de 23.8% y 27.3%; lo que nos refleja que este suelo se comportará en su estado plástico entre el rango de humedades de 23.8% y 55.7%.
- Las humedades para el límite de contracción se encuentran entre 9.0 % y 13.0%, con lo que el volumen de dicho suelo ya no cambiará a partir de una humedad con porcentaje menor a 9.0%.

- Utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.), por medio de la carta de plasticidad, clasificamos el banco de San Miguel como CH, dicha clasificación corresponde a una Arcilla Inorgánica de Alta Plasticidad, de color negro.
- La clasificación realizada por medio de la carta de plasticidad coincide de gran manera con los resultados obtenidos por la identificación de minerales mediante el método de difracción de Rayos "X", para este banco los minerales presentan una gran plasticidad, lo que se comprobó por medio de la prueba de difracción ya que la misma muestra fue analizada dos veces, un análisis se realizó con la muestra secada al aire y el otro se realizó con la muestra saturada con glicol, con el propósito de tener una medida de la expansibilidad que presentaban dichas muestras.
- Los valores del límite líquido para el banco de Guatajiagua oscilaron entre los porcentajes de humedades de 40.0% y 46.0%, con lo que podemos decir que para humedades con un porcentaje mayor en este suelo, se tendrá pérdida de su cohesión y se deformará con esfuerzos muy pequeños.

- Los porcentajes de las humedades para el límite plástico para el banco de Guatajiagua variaron dentro del rango de 20.5% y 28.5%; lo que nos refleja que este suelo se comportará en su estado plástico entre el rango de humedades de 20.5% y 46.0 %.
- Las humedades correspondientes al límite de contracción para el banco de Guatajiagua se encuentran entre 11.0 % y 13.0 %, con lo que el volumen de dicho suelo ya no cambiará a partir de una humedad con porcentaje menor a 11.0 %.
- Los minerales arcillosos encontrados en el banco de Guatajiagua, pertenecen al grupo de las esmectitas (saponita, nontronita y montmorillonitas), el grupo de las Cloritas (clorita) y al grupo de las Caolinitas (halloysitas) son en gran mayoría minerales arcillosos de baja plasticidad, dándole al suelo sus características.
- Los minerales no arcillosos encontrados en el banco de Guatajiagua fueron Labradorita, Augita, Horblenda, Cristobalita y Oligoclasa.
- Para el banco de Guatajiagua encontramos que, de la muestra tomada en campo (12 sondeos), se encuentra constituida por un 5% de Saponita, 7% de Nontronita, 11% Montmorillonita, 21% Clorita, 7% Halloysita, 11%

Zeolita, 9% Bentonita, 11% Labradorita, 2% Augita, 12% Horblenda, 2% Cristobalita y 2% Oligoclasas.

- A pesar de que en el banco de Guatajiagua encontramos arcillas del grupo de las esmectitas, que pueden hacer que el banco se comporte con alta plasticidad, en dicho banco predominó un comportamiento de una arcilla con mediana plasticidad, esto se debe a que las arcillas del grupo de la caolinita se encuentran en mayor porcentaje.
- De acuerdo a los planos de zonificación, para el banco de Guatajiagua se puede apreciar que la montmorillonita se encuentra al lado sur del banco, pero también en esta zona tenemos presencia de Clorita y Halloysita (menos expansibles) en un mayor porcentaje.
- De acuerdo a los tipos de minerales arcillosos que se encuentran en el banco de Guatajiagua, dichas arcillas pueden ser explotadas como materia prima para la fabricación de artesanías.
- Utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.) por medio de la carta de plasticidad, clasificamos el banco de Guatajiagua como CL, dicha clasificación corresponde a una Arcilla Inorgánica de Plasticidad media, esta arcilla la encontramos en color rojo y en color negro.

- Entre los dos bancos estudiados, en San Miguel encontramos mayor porcentaje de minerales arcillosos altamente expansibles en comparación con el banco de Guatajiagua que se encontró minerales arcillosos menos expansibles. Por lo que afirmamos que el banco estudiado en San Miguel tiene un comportamiento más plástico que el banco estudiado en Guatajiagua.
- Para la comparación de la expansión de las muestras vrs su Límite Líquido (ver tablas 5.4.1 y 5.4.2), esperábamos que cuando una muestra reflejara una alta expansión se viera reflejado con un límite líquido arriba del 50%; y lo contrario, cuando se tuviera menor expansión de la muestra esperábamos un límite líquido menor a 50%. Esto no ocurrió así, debido a que las expansiones encontradas pertenecen a las moléculas, osea se encuentra a una “microescala”, en comparación al límite líquido que depende del comportamiento de las partículas como un todo, en otras palabras a una “macroescala”. Es por esto que dichos parámetros (expansibilidad de la muestra y límite líquido), no pueden ser comparados.
- Los resultados de los límites de consistencia se encuentran dentro de los valores promedio obtenidos en estudios realizados en zonas cercanas a los bancos.

RECOMENDACIONES.

- Para obtener un mayor provecho de la prueba de difracción de Rayos “X”, es necesario contar con una instrucción previa que permita adquirir cierta experiencia en la técnica y en la identificación de los difractogramas.
- Para el análisis de los difractogramas, recomendamos el uso del método de Hanawalt, ya que fue con este método que analizamos nuestras muestras y en nuestra percepción fue muy sencillo de entender aunque sumamente tedioso y lento, lo cual podría solventarse con la adquisición de los programas de interpretación y las bases de datos. No obstante a medida se adquiere experiencia con los difractogramas, el trabajo se facilita.
- A pesar de que el difractómetro posee un sistema de seguridad para impedir la exposición a los Rayos “X” del laboratorista, éste debe seguir todas las normas de seguridad.
- Mientras transcurre el período de secado de las muestras es importante protegerlas para evitar cualquier tipo de contaminación, lo que podría afectar en la identificación de minerales.

- Para realizar la toma de muestras es necesario realizar visitas de campo, que permitan conocer bien en detalle toda el área en estudio, con el fin de poder definir las mejores zonas de las cuales se extraerán las muestras a analizar, tener una idea de los resultados que se esperan y dar un mejor análisis de los resultados.
- Para encontrar la humedad en las muestras respectivas para los tres estados de consistencia del suelo, se debe tener el cuidado de dejar secando en el horno las muestras el tiempo requerido por la norma, ya que esto puede incidir bastante en los resultados (ver figura 2.3.8).
- Antes de usar los instrumentos de medición para cualquier tipo de ensayo es muy importante que dichos instrumentos estén debidamente calibrados y en buen estado, ya que esto podría llegar a influir de gran manera en los resultados.
- Al efectuar cualquiera de los ensayos de los límites de Atterberg el tiempo de saturación de la muestra, previo a la realización del ensayo, juega un papel muy importante ya que muestras con diferentes periodos de saturación pueden arrojar valores muy desiguales, independientemente del límite que se vaya a determinar.

- Es recomendable verificar la temperatura del horno en donde se secan las muestras, ya que la norma es clara con respecto a la temperatura de secado de las muestras, la cual es de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Como en todo laboratorio de suelos se realizan diversos ensayos y como la gran mayoría hacen uso del horno para determinar humedades, es aconsejable no introducir muestras húmedas y de gran volumen en comparación con las que se usan para la determinación de los límites, sobre todo si el período de secado de éstas últimas está llegando a su final ya que su humedad podría incrementarse por la humedad que es liberada por las que fueron recién introducidas, afectando los resultados.
- Se deben pesar las muestras ensayadas inmediatamente se han finalizado las pruebas para determinar los límites, para obtener la humedad correcta.
- Mantener limpios los instrumentos antes de realizar un nuevo ensayo, para evitar cualquier tipo de error, tales como contaminación de la nueva muestra ensayada con desperdicio de la anterior, diferencias significativas en el peso, etc.
- Cuando se trabaja con una gran cantidad de datos es recomendable hacer uso de valores estadísticos para obtener un resultado mucho más exacto y

cercano a la realidad, sobre todo cuando estos valores son obtenidos mediante pruebas sensibles a la técnica del operador.

- Actualmente las arcillas pertenecientes al banco de Guatajiagua está siendo explotada para la fabricación de artesanías, además este tipo de arcilla puede ser utilizada en la fabricación de materiales de construcción como por ejemplo ladrillos y tejas, pero esto no es recomendable ya que los métodos utilizados para su elaboración conllevan graves consecuencias para el medio ambiente, esto podría solventarse si se utilizaran métodos no destructivos en su fabricación.
- Para el banco de San Miguel la zona que se recomienda como uso agrícola es la zona oeste, ya que los minerales arcillosos predominantes en esa área son del grupo de las esmectitas, las cuales presentan una gran capacidad de absorción, lo que beneficiaría de gran manera a las especies vegetales que se puedan cosechar, ya que estas obtienen el agua del suelo y éste mantendría una buena humedad.
- El método de Casagrande está sujeto a múltiples factores, entre los cuales destaca la sensibilidad en la técnica del operador, dichos factores pueden

dar lugar a que ensayos sobre un mismo suelo den resultados distintos, ya sean ensayados por el mismo operador ó por operadores distintos.

- El estudio de las arcillas es muy amplio y en este trabajo solo tocamos su clasificación y mineralogía, por lo que esperamos que este sea el punto de partida para seguir estudiando estos tipos de suelos y se puedan dar mejores soluciones de estabilización a la hora de utilizarlas como base para cualquier obra civil.
- Las pruebas descritas en nuestra investigación no son las únicas que existen, de hecho en el marco teórico se mencionan diferentes ensayos, los cuales no llevamos a la práctica, por lo que consideramos recomendarles que en otro trabajo de investigación si se puedan llevar a cabo, con el fin de comparar sus resultados, quedando a criterio del analista, concluir cuáles son los más cercanos al valor verdadero.

BIBLIOGRAFÍA.

- Eduardo Besoain, “Mineralogía de arcillas de suelos”, San José Costa Rica; IICA año 1985.
- American Society for Testing and Materials (2003), “Libro anual de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales”, ASTM D4318-98 volumen 04.08 para pruebas de límites de consistencia ó límites de Atterberg
- Laboratorios ELE internacional, “Catálogo equipo para pruebas en materiales de construcción”, sexta edición.
- Universidad de El Salvador, “Guía de laboratorio mecánica de suelos”.
- Braja M. Das, Thompson Learning, “Fundamentos de ingeniería geotécnica”, Universidad de California.
- J.A. Jiménez Salas y J.L. de Justo Alpañes, “Geotécnia y cimientos I”, Madrid, España.

- Legget / Karrow, “Geología aplicada a la ingeniería civil”, McGraw-Hill, Ciudad de México.
- Juárez Badillo y Rico Rodríguez, “Fundamentos de la Mecánica de Suelos”, Tomo I, Editorial LIMUSA S.A., año 2000.
- Terzaghi, Karl y Peck B Rafael, “Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica”, año 1958.
- Sowers, B. George y Sowers, F. George, “Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones”, Sexta Edición, Editorial LIMUSA S.A.
- Phillips Company, “Manual de operación del generador PW1730”, año 1973.
- Phillips Company, “Manual de operación del control de canal PW1390”, año 1973.
- Phillips Company, “Manual de operación del goniómetro horizontal PW1380”, año 1973.