



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Geotecnia

**DIFERENCIAS DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS EN ARCILLAS
DE TRES FORMACIONES GEOLÓGICAS, DISTRIBUIDAS EN EL BLOQUE
CHORTÍ, REPÚBLICA DE GUATEMALA**

Ing. Sergio Antonio Castellanos López
Asesorado por: Msc. Ing. Julio Roberto Luna Aroche.

Guatemala, noviembre de 2015.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DIFERENCIAS DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS EN ARCILLAS
DE TRES FORMACIONES GEOLÓGICAS, DISTRIBUIDAS EN EL BLOQUE
CHORTÍ, REPÚBLICA DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ING. SERGIO ANTONIO CASTELLANOS LÓPEZ

ASESORADO POR EL MSC. ING. JULIO ROBERTO LUNA AROCHE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

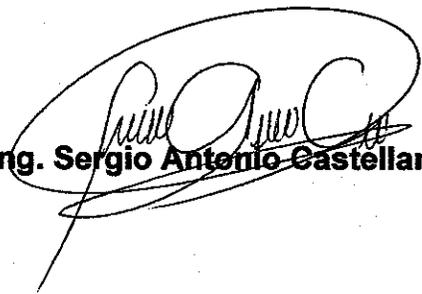
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Murphy Olimpo Paiz
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aguilar Tumax
EXAMINADOR	Ing. Armando Fuentes Roca
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DIFERENCIAS DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS EN ARCILLAS DE TRES FORMACIONES GEOLÓGICAS, DISTRIBUIDAS EN EL BLOQUE CHORTÍ, REPÚBLICA DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 05 de mayo de 2014.


Ing. Sergio Antonio Castellanos López



FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC
EP
ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

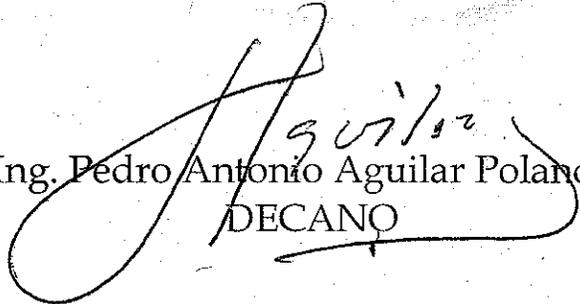
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / Ext. 86226

Ref. APT-2015-049

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Postgrado, al Trabajo de Tesis de la Maestría en Ingeniería Geotécnica titulado: **"DIFERENCIAS DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS EN ARCILLAS DE TRES FORMACIONES GEOLÓGICAS, DISTRIBUIDAS EN EL BLOQUE CHORTÍ, REPÚBLICA DE GUATEMALA"** presentado por el Ingeniero Civil Sergio Antonio Castellanos López, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
DECANO

Guatemala, Noviembre de 2015.





FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC
ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

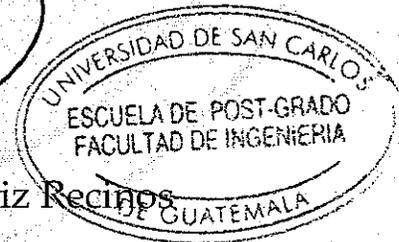
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2015-049

El Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística del Trabajo de Tesis titulado **"DIFERENCIAS DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS EN ARCILLAS DE TRES FORMACIONES GEOLÓGICAS, DISTRIBUIDAS EN EL BLOQUE CHORTÍ, REPÚBLICA DE GUATEMALA"** presentado por Ingeniero Civil **Sergio Antonio Castellanos López**, correspondiente al programa de Maestría en Ingeniería Geotécnica; apruebo y autorizo el mismo.

"Id y Enseñad a Todos"

MSc. Ing. ~~Murphy~~ Olympo Paiz Recinos
Director
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, Noviembre de 2015.

Cc: archivo
/la



FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC
ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

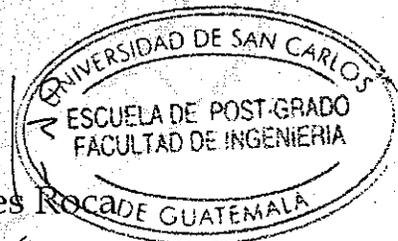
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2015-049

Como Coordinador de la Maestría en Ingeniería Geotécnica y revisor del Trabajo de Tesis titulado **"DIFERENCIAS DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS EN ARCILLAS DE TRES FORMACIONES GEOLÓGICAS, DISTRIBUIDAS EN EL BLOQUE CHORTÍ, REPÚBLICA DE GUATEMALA"** presentado por el Ingeniero Civil **Sergio Antonio Castellanos López**, apruebo y recomiendo la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"

MSc. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, Noviembre de 2015.

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Dador de sabiduría e inteligencia, la gloria le pertenece a Él.
Mis padres	Ruth Noemí López Revolorio y Sergio Alberto Castellanos Flores. Su amor será siempre mi inspiración.
Mis hermanas	Nancy y Lisbeth, estar unidos nos hace fuertes, un éxito más para nosotros.
Mis tíos	Por su amor y apoyo incondicional.
Mis primos	Como un ejemplo de que las metas con esfuerzo y dedicación se pueden alcanzar, en especial al Arq. José Luis López Palencia, por ser un ejemplo de excelencia y perseverancia académica.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por extender su mano y brindar conocimiento a la población sin envidia y con excelencia.
Facultad de Ingeniería	Por la excelente preparación académica y personal recibida.
Inga. Natalia Rodas	“Si yo tuviera un corazón, escribiría mi odio sobre el hielo, y esperararía a que saliera el sol.” GGM. Gracias por el empujón.
Ing. Luis Contreras	Por ser una importante influencia en mi carrera.
Dirección General de Minería	En especial al Director Fernando Castellanos, por su apoyo incondicional y por facilitar todas las herramientas para realizar esta investigación.
Mi asesor	Ing. Julio Luna, es un honor poder llamarlo colega y amigo.
Ing. Luis Roberto López	Porque este sueño se inspiró en su vida, seguir sus pasos es un gran honor.
Ing. Ernesto Marroquín	Por todo el apoyo en los ensayos de laboratorio.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
GLOSARIO	XV
RESUMEN	XIX
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXV
Hipótesis.....	XXVI
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXVII
INTRODUCCIÓN	XXXV
1. GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS	1
1.1. Definiciones de arcilla	1
1.2. Naturaleza química de las arcillas	2
1.3. Propiedades físicas, químicas y mecánicas de las arcillas.....	4
1.4. Geología general de las arcillas.....	8
1.5. Condiciones y factores ambientales relacionados con la formación de minerales arcillosos durante el proceso de meteorización	10
1.5.1. Erosión química.....	10
1.5.1.1. Hidratación.....	10
1.5.1.2. Hidrólisis	10
1.5.1.3. Disolución	11

1.5.1.4.	Oxidación	11
1.5.2.	Erosión <i>In Situ</i>	11
1.5.2.1.	Temperatura.....	12
1.5.2.2.	Crecimiento de cristales	12
1.5.2.3.	Tensiones de la corteza terrestre	12
1.5.2.4.	Efectos de gravedad	13
1.6.	Clasificación y nomenclatura de las arcillas	13
1.6.1.	Clasificación de arcillas, según su origen.....	13
1.6.1.1.	Grupo del Caolín	15
1.6.1.2.	Grupo de la Montmorillonita	15
1.6.1.3.	Grupo de la Illita – Hidrómica - Halloysita	15
1.6.1.4.	Grupo de la Attapulguita y Sepiolita	16
1.6.1.5.	Grupo de la Alófana	16
1.6.2.	Clasificación de arcillas según su uso.....	16
1.7.	Análisis geotécnico de las arcillas	18
1.7.1.	Propiedades físico-mecánicas	18
1.7.1.1.	Plasticidad.....	19
1.7.1.2.	Color.....	20
1.7.1.3.	Tamaño de partícula	21
1.7.1.4.	Resistencia.....	22
1.7.1.5.	Porosidad y permeabilidad	23
1.7.2.	Ensayos de laboratorio.....	23
1.7.2.1.	Granulometría	24
1.7.2.2.	Límites de Atterberg	24

1.7.2.3.	Corte directo	25
1.7.2.4.	Consolidación	26
1.7.2.5.	Gravedad específica.....	27
1.7.3.	Construcción en suelos arcillosos	28
1.7.4.	Estabilización en suelos arcillosos	30
2.	FORMACIONES GEOLÓGICAS INVESTIGADAS	33
2.1.	Ambiente tectónico de Guatemala	33
2.2.	Bloque Chortí.....	35
2.3.	Descripción de las tres formaciones geológicas seleccionadas para su investigación.....	36
2.3.1.	Unidad I, Rocas Ígneas y Metamórficas, Terciarias (Escala 1/500000).....	37
2.3.2.	Unidad Pzm, Grupo el Tambor, Paleozoico (Escala 1/500000).	38
2.3.3.	Unidad Qp, Rocas Ígneas y Metamórficas, Cuaternario (Escala 1/500000).....	39
2.4.	Ubicación y toma de muestras.....	40
2.4.1.	Muestra M ₁ , Unidad Pzm.....	41
2.4.2.	Muestra M ₂ , Unidad Qp	41
2.4.3.	Muestra M ₃ , Unidad I.....	43
2.4.4.	Procedimiento de toma y tratamiento de muestras	44
2.4.5.	Proceso de meteorización	45

3. MARCO PRÁCTICO	47
3.1. Ensayos de laboratorio	47
3.1.1. Análisis químico-mineralógico, muestra M ₁	47
3.1.2. Análisis químico-mineralógico, muestra M _{2a}	49
3.1.3. Análisis químico-mineralógico, muestra M _{2b}	49
3.1.4. Análisis químico-mineralógico, muestra M _{3a}	50
3.1.5. Análisis químico-mineralógico, muestra M _{3b}	51
3.1.6. Análisis físico-mecánico de la muestras de arcilla	51
3.1.6.1. Granulometría, M ₁	51
3.1.6.2. Límites de Atterberg, M ₁	53
3.1.6.3. Corte directo, M ₁	53
3.1.6.4. Consolidación y gravedad específica, M ₁	54
3.1.6.5. Granulometría, M _{2a}	56
3.1.6.6. Límites de Atterberg, M _{2a}	57
3.1.6.7. Corte directo, M _{2a}	58
3.1.6.8. Consolidación y gravedad específica, M _{2a}	59
3.1.6.9. Granulometría, M _{2b}	61
3.1.6.10. Límites de Atterberg, M _{2b}	62
3.1.6.11. Corte directo, M _{2b}	63
3.1.6.12. Consolidación y gravedad específica, M _{2b}	64
3.1.6.13. Granulometría, M _{3a}	66
3.1.6.14. Límites de Atterberg, M _{3a}	67
3.1.6.15. Corte directo, M _{3a}	68
3.1.6.16. Consolidación y gravedad específica, M _{3a}	69

3.1.6.17. Granulometría, M3b.....	71
3.1.6.18. Límites de Atterberg, M3b.....	72
3.1.6.19. Corte directo, M3b	73
3.1.6.20. Consolidación y gravedad específica, M3b.....	74
3.2. Presentación de resultados	76
3.3. Interpretación de resultados obtenidos	79
3.3.1. Interpretación de resultados, muestra M ₁	79
3.3.2. Interpretación de resultados, muestra M2a	79
3.3.3. Interpretación de resultados, muestra M2b	80
3.3.4. Interpretación de resultados, muestra M3a	80
3.3.5. Interpretación de resultados, muestra M3b	81
4. PARÁMETROS FÍSICO-MECÁNICOS OBTENIDOS, DE LAS ARCILLAS MUESTREADAS, SEGÚN LA CLASIFICACIÓN QUÍMICO-MINERALÓGICA .	83
4.1. Comparación de resultados	83
4.2. Análisis de variaciones obtenidas.....	86
4.2.1. Relación entre porcentaje de arcillas respecto a índice de plasticidad	86
4.2.2. Resistencia al cortante, ángulo de fricción	90
4.2.3. Resistencia al cortante, cohesión	92
4.2.4. Análisis de propiedades mecánicas de las arcillas.....	93
4.2.4.1. Caracterización de las arcillas formadas por suelo residual	93
4.2.4.2. Ensayos en arcillas residuales.....	94

4.3. Propuestas de mejora de suelos arcillosos	95
4.3.1. Sustitución de suelo	96
4.3.2. Mezcla de suelo	96
4.3.3. Recompactación de suelo	97
4.3.4. Control de humedad.....	98
4.3.5. Mezcla con conglomerantes.....	98
4.3.6. Estabilización	99
CONCLUSIONES.....	101
RECOMENDACIONES.....	105
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
APÉNDICE	111
ANEXOS.....	113

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Influencia de la composición mineralógica en la plasticidad	20
2.	Cambio de volumen en función de la formación mineralógica de las arcillas	21
3.	Influencia de la mineralogía en la resistencia de las arcillas.....	22
4.	Tendencia de las arcillas saturadas	25
5.	Representación gráfica del ensayo de corte directo	26
6.	Principios de la consolidación	27
7.	Mapa Tectónico de Guatemala.....	34
8.	Bloque Chortí	36
9.	Afloramiento de rocas volcánicas terciarias en el bloque Chortí.....	38
10.	Afloramientos del Grupo el Tambor en el bloque Chortí	39
11.	Afloramiento de rocas volcánicas cuaternarias en el bloque Chortí.....	40
12.	Ubicación geológica de la muestra M ₁	41
13.	Ubicación geológica de las muestras M ₂	42
14.	Ubicación geológica de las muestras M ₃	43
15.	Curva granulométrica de la muestra M ₁	52

16.	Envolvente de falla, corte directo.....	54
17.	Curva de consolidación muestra M_1	55
18.	Curva granulométrica de la muestra M_{2a}	57
19.	Envolvente de falla, corte directo.....	58
20.	Curva de consolidación muestra M_{2a}	60
21.	Curva granulométrica de la muestra M_{2b}	62
22.	Envolvente de falla, corte directo.....	63
23.	Curva de consolidación muestra M_{2b}	65
24.	Curva granulométrica de la muestra M_{3a}	67
25.	Envolvente de falla, corte directo.....	68
26.	Curva de consolidación muestra M_{3a}	70
27.	Curva granulométrica de la muestra M_{3b}	72
28.	Envolvente de falla, corte directo.....	73
29.	Curva de consolidación muestra M_{3b}	75
30.	Relación de índice de plasticidad y fracción arcillosa	87
31.	Gráfica de relación A, arcillas bloque Chortí.....	89
31.	Correlación del ángulo de fricción vrs. contenido de Si y Al	91
32.	Correlación de cohesión vrs. contenido de Si y Al.....	92

TABLAS

I.	Clasificación de arcillas según su estructura.	3
II.	Clasificación de las arcillas según su origen.....	14
III.	Clasificación de las arcillas según su uso.....	17
IV.	Gravedad específica de los solidos en algunos suelos	28
V.	Resultados químico-mineralógicos de la muestra M ₁ a	48
VI.	Resultados químico-mineralógicos de la muestra M ₁ b	48
VII.	Resultados químico-mineralógicos de la muestra M ₂ a	49
VIII.	Resultados químico-mineralógicos de la muestra M ₂ b	50
IX.	Resultados químico-mineralógicos de la muestra M ₃ a	50
X.	Resultados químico-mineralógicos de la muestra M ₃ b	51
XI.	Granulometría de la muestra M ₁	52
XII.	Límites de Atterberg muestra M ₁	53
XIII.	Resultados del ensayo de corte directo para la muestra M ₁	53
XIV.	Resultados de consolidación, M ₁	54
XV.	Datos para elaborar curva de compresibilidad, M ₁	55
XVI.	Granulometría de la muestra M ₂ a	56
XVII.	Datos para determinar límite líquido de la muestra M ₂ a.....	57

XVIII.	Resultados del ensayo de corte directo para la muestra M _{2a}	58
XIX.	Resultados de consolidación, M _{2a}	59
XX.	Datos para elaborar curva de compresibilidad, M _{2a}	59
XXI.	Granulometría de la muestra M _{2b}	61
XXII.	Datos para determinar límite líquido de la muestra M _{2b}	62
XXIII.	Resultados del ensayo de corte directo para la muestra M _{2b}	63
XXIV.	Resultados de consolidación, M _{2b}	64
XXV.	Datos para elaborar curva de compresibilidad, M _{2b}	64
XXVI.	Granulometría de la muestra M _{3a}	66
XXVII.	Datos para determinar límite líquido de la muestra M _{3a}	67
XXVIII.	Resultados del ensayo de corte directo para la muestra M _{3a}	68
XXIX.	Resultados de consolidación, M _{3a}	69
XXX.	Datos para elaborar curva de compresibilidad, M _{3a}	69
XXXI.	Granulometría de la muestra M _{3b}	71
XXXII.	Datos para determinar límite líquido de la muestra M _{3b}	72
XXXIII.	Resultados del ensayo de corte directo para la muestra M _{3b}	73
XXXIV.	Resultados de consolidación, M _{3b}	74
XXXV.	Datos para elaborar curva de compresibilidad, M _{3b}	74
XXXVI.	Resultados de ensayos de laboratorio de la muestra M ₁	76

XXXVII.	Resultados de ensayos de laboratorio de la muestra M _{2a}	77
XXXVIII.	Resultados de ensayos de laboratorio de la muestra M _{2b}	77
XXXIX.	Resultados de ensayos de laboratorio de la muestra M _{3a}	78
XL.	Resultados de ensayos de laboratorio de la muestra M _{2b}	78
XLI.	Tabla comparativa de resultados químico-mineralógicos.....	84
XLII.	Tabla comparativa de resultados físico-mecánicos.....	85
XLIII.	Cálculo de valores A.....	88
XLIV.	Comparación valores A, respecto a otras arcillas investigadas.....	88
XLV.	Comparación de ángulos de fricción interna.....	90
XLVI.	Caracterización de suelos residuales.....	94

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Al	Aluminio
φ	Ángulo de fricción interna
A	Área
Ca	Calcio
C_u	Coefficiente de uniformidad
C	Cohesión
$\Delta\sigma$	Esfuerzo axial
T	Esfuerzo de corte
σ	Esfuerzo normal
P	Fósforo
G_s	Gravedad específica
H	Hidrógeno
Fe	Hierro
Mg	Magnesio
Mn	Manganeso
O	Oxígeno
K	Potasio
Ph	Presión horizontal
Pv	Presión vertical
Δp	Sobrecarga en superficie
Na	Sodio
Ti	Titanio

GLOSARIO

Cambios diagenéticos	Conjunto de procesos geológicos mediante los cuales un sedimento se transforma en roca sedimentaria.
Capilaridad	Propiedad de atraer un cuerpo sólido y hacer subir por sus paredes hasta cierto límite el líquido que las moja, como el agua, y de repeler y formar a su alrededor un hueco o vacío con el líquido que no las moja.
Cohesión	Fuerza de atracción que mantiene las moléculas unidas.
Coloide	Estado de la materia en el que un sólido o un líquido está disperso en otro.
Desplazamiento dextral	Desplazamiento en dirección derecha.
Desplazamiento sinestral	Desplazamiento en dirección izquierda.
Detritos	Cada una de las partículas que resultan de la descomposición de una roca o de otro cuerpo.

Erosión	Desgaste de la superficie terrestre por agentes externos, como el agua o el viento.
Estrato	Masa mineral en forma de capa que constituye los terrenos sedimentarios.
Fallas	Abertura que los movimientos geológicos han producido en un terreno.
Filón	Masa metalífera o pétreo entre dos capas de un terreno.
Fracturas	Aspecto de una roca o mineral cuando se rompe.
Lutitas	La lutita es una roca sedimentaria compuesta por partículas del tamaño de la arcilla y del limo.
M₁	Muestra uno, proveniente del departamento de El Progreso.
M_{2(a,b)}	Muestra dos, proveniente del departamento de Santa Rosa
M_{3(a,b)}	Muestra tres, proveniente del límite municipal de los departamentos de Santa Rosa y Jalapa

Propiedades reológicas	Son aquellas que están relacionadas con la deformación y el fluir de la materia.
Poros	Pequeña cavidad entre las partículas o moléculas que constituyen un cuerpo sólido.
Tamiz	Cedazo muy tupido.
Trabajabilidad	Facilidad de mezclar materiales.
Vetas	Filón de un mineral.
Yacimiento	Sitio donde se halla naturalmente una roca, un mineral, un fósil, o restos arqueológicos.

RESUMEN

Ésta investigación incluye los conceptos generales sobre las arcillas, su naturaleza, comportamiento general y condiciones ambientales en las cuales se encuentran, su clasificación y los diferentes usos a los cuales pueden ser sometidas.

Asimismo analiza las arcillas como estructura de suelo, los tipos de cimentación de obras civiles y geotécnicas a las que pueden ser sometidas y la forma en que pueden ser estabilizadas según el tipo de obra que soportarán.

Se realizarán estudios de laboratorio químico-mineralógicos como físico-mecánicos para localizar las diferencias entre las clases de arcillas, se toma como punto de comparación la formación geológica de la que fueron extraídas y sus diferencias mineralógicas.

Por último esta investigación tendrá como resultado, tablas comparativas que permitirán conocer el comportamiento mecánico del material en el suelo y macizos rocosos al momento de intervenirlos para la construcción de una obra civil o geotécnica, basado en la posición geológica de donde provenga.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS

Descripción del problema

El desarrollo de muchos municipios y asentamientos urbanos ha tenido lugar sobre suelos cohesivos, en la que un depósito lacustre formado por mantos de suelos arcillosos profundos cubre una amplia porción de su área. Estas formaciones arcillosas pueden encontrarse en grandes cantidades de suelo o pequeñas formaciones dispersas en estratos variables, que dependen de su formación y estructura geológica, por lo que su presencia en las cimentaciones y anclaje de obras civiles o geotécnicas son muy probables.

El problema de las arcillas en la cimentación y anclajes de obras en macizos arcillosos recae en sus propiedades mecánicas, al ser un material cohesivo puede causar asentamientos o hinchamientos en los proyectos cuando no se detecta la presencia de la misma o bien no se hace un buen tratamiento al material. Al identificar dos grandes grupos de arcillas con sus respectivos subgrupos, los cuales basan sus diferencias en las propiedades mineralógicas y químicas. Por lo tanto, es necesario conocer las diferencias físico-mecánicas de las mismas para determinar el tipo de tratamiento recomendado o precauciones a considerar al momento de trabajar con arcillas, para evitar trastornos en obras civiles y geotécnicas.

Formulación del problema

En las últimas décadas, un área importante del estudio de la mecánica de suelos ha sido conducida al desarrollo de modelos que se ajustan mejor a la realidad física de estos geo materiales. Esto encamina la presente investigación hacia la formulación de una pregunta principal:

¿Existen diferencias en las propiedades mecánicas de las arcillas derivadas de su formación mineralógica?

Al profundizar esta investigación, surgirán preguntas secundarias que requerirán ser contestadas:

¿Afectan estas diferencias el esfuerzo de falla del suelo?,

¿Cuál es la variación de los parámetros de la modelación numérica en cada formación evaluada?,

¿Los elementos químicos variables que presenta cada formación afectan directamente las propiedades mecánicas de las arcillas?,

¿Son significativas las diferencias mecánicas de las arcillas de distintas formaciones geológicas?

La falta de respuestas concretas a las interrogantes planteadas, sumado a información escasa sobre ensayos de laboratorio, hace de la metodología para la determinación de los parámetros de las arcillas, así como de la evaluación de su capacidad y aplicabilidad frente a una tarea específica, partes fundamentales en todo análisis de la presente investigación.

Delimitación del problema

- ¿Cuándo? Las muestras deben ser tomadas, remoldeadas y ensayadas en un período de 1 a 4 meses después del inicio del estudio.
- ¿Dónde? En áreas con antecedentes geológicos de formaciones arcillosas dentro de los departamentos de El Progreso y Santa Rosa.
- ¿Cómo? Las muestras deben ser tomadas en formaciones arcillosas que funcionen como canteras o bien del suelo; los ensayos deben realizarse en un laboratorio certificado que aplique las normas y requerimientos que cumplan las demandas internacionales y nacionales.

Alcances y limitaciones del tema

Alcances: la investigación tiene como finalidad analizar y fundamentar las diferencias físico-mecánicas de las arcillas, mediante ensayos de laboratorio iniciando con sus diferencias químico-mineralógicas en formaciones de regiones geológicas propias de la república de Guatemala. Al concluir la misma se obtendrán tablas comparativas que recopilarán los valores cuantitativos de las variables que afectan las propiedades mecánicas de las arcillas en las regiones geológicas analizadas. Los resultados de las variables cualitativas que las diferencian derivado de su formación geológica y se propondrán soluciones de tratamiento de suelo para que el diseñador pueda pre-dimensionar su obra o estabilizar una existente.

Limitaciones: al ser Guatemala tan variable geológicamente, los resultados esperados no representan en su totalidad el comportamiento que puede generar cada una de las formaciones geológicas dispersas en el país, por

lo que los valores mecánicos presentados en esta investigación, resultado de las muestras propuestas no deben ser usadas como valores finales de diseño, únicamente como parámetro de comparación.

El estudio no incluye el comportamiento de las arcillas en grandes profundidades, para ello se necesitarían muestras de estratos a profundidades mayores de cinco metros, las cuales no se encuentran en todas las regiones geológicas del país, pues las arcillas al ser producto de la meteorización y deposición regularmente se encuentran superficialmente.

Las regiones geológicas serán analizadas a nivel macro. Para valores puntuales se necesitan estudios específicos del lugar, aunque los parámetros al ser de comparación no deberían variar considerablemente.

OBJETIVOS

General

Determinar las diferencias de las propiedades físico-mecánicas en arcillas clasificadas, mediante su composición químico-mineralógica.

Específicos

1. Analizar entre una y tres correlaciones, mediante ensayos básicos de caracterización química y pruebas físico - mecánicas sobre muestras de arcilla reconstituidas en laboratorio, el comportamiento geológico de las mismas.
2. Obtener la relación entre el porcentaje de arcilla, respecto al índice de plasticidad de las muestras.
3. Determinar la correlación entre la resistencia al cortante evaluando ángulo de fricción interna y cohesión respecto al contenido de sílice y aluminio en las muestras de arcilla.
4. Evaluar si los elementos mineralógicos que marcan diferencia en la formación geológica de las arcillas, afectan directamente en las propiedades mecánicas de las mismas.

5. Registrar tablas de valores comparativos de las propiedades mecánicas de las arcillas, donde se tomará como base los grupos geológicos a los que pertenece.

Hipótesis

Dada la premisa que indica que la clasificación de las arcillas depende de un elemento mineralógico variable en su composición química-geológica se presenta la siguiente hipótesis:

“Las propiedades mecánicas de las arcillas presentan diferencias derivadas de su formación química-mineralógica”.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

Tipos de estudio

La investigación presenta los siguientes tipos de estudio:

- **Retrospectivo:** “Los datos (secundarios) son recogidos de ensayos publicados, bases de datos, o cualquier otro tipo de registro en los cuales el investigador no ha participado, ocasionando que no se pueda dar fe de la exactitud de las mediciones.” (Huacho, 2011)
- **Experimental:** Se cuenta con una planificación preliminar de los resultados esperados, la medición de los mismos se encuentra en función de las características de las arcillas derivadas de su formación geológica, se analizarán los datos y las relaciones de las variables cuantitativas.
- **Correlacional:** Mide dos o más variables que se pretenden investigar y comprobar si están o no correlacionadas con el mismo sujeto para después analizar la correlación. Tiene como propósito medir el grado de relación que se tiene entre variables.
- **Mixto:** Las arcillas son el elemento principal del estudio y se tienen como variables principales sus características químico mineralógicas y físico mecánicas; se evaluarán aspectos cualitativos tales como el color del mineral y tamaño de grano, así

como, aspectos cuantitativos como sus resistencia al corte, límites de plasticidad, entre otros.

Análisis teórico retrospectivo

- Recopilación y análisis de información de bibliografía e investigación científica relacionada con las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las arcillas en bibliotecas y centros de información virtual.
- Consulta de especificaciones de las normas para efectuar los ensayos químico-geológicos y mecánicos de las propiedades del material disponibles para los ensayos aplicables en Guatemala.
- Consulta de mapas geológicos para identificar las zonas de formaciones arcillosas y su distribución en la república de Guatemala, que se encuentren disponibles al público o bien en instituciones gubernamentales o privadas que cuenten con los mismos.

Experimental

La variable independiente en la formación geológica es el contenido de minerales dentro de las arcillas, cuya composición será evaluada mediante ensayos químico-mineralógicos; una vez identificado el grupo geológico al que pertenece la muestra, se identificará qué elemento hace que la variable dependiente cambie sus propiedades mecánicas, esto será evaluado mediante ensayos físicos de laboratorio para obtener los parámetros mecánicos de la muestra y su incidencia en los usos de obras civiles y geotécnicas a las que puedan ser sometidas.

La validez interna del proyecto será comprobada toda vez que se demuestre que la variable independiente al ser manipulada y analizada demuestre ser responsable de los cambios y diferencias de propiedades de la variable dependiente, mientras que, la validez externa del experimento probará si las diferencias entre las formaciones elegidas para el estudio pueden generalizarse.

- Obtención de tres muestras como mínimo de arcillas en canteras y formaciones geológicas conocidas, extrayéndolas de forma manual. Cada muestra debe ser de una región geológica distinta para así poder evaluar las diferencias entre las mismas.

- Trasladar las muestras a un laboratorio químico para los ensayos de identificación y clasificación geológica de la muestra. Los ensayos deben identificar en qué proporciones se encuentra el contenido de:
 - Silicio
 - Aluminio
 - Bario
 - Calcio
 - Magnesio
 - Sodio
 - Hierro

- Una vez identificada la clasificación del material, trasladarlo al laboratorio de mecánica de suelos para realizar los ensayos de caracterización mecánica recomendados por (Suárez, 2009, pág. 188):

- Granulometría por sedimentación
 - Límites de Atterberg
 - Corte directo
 - Consolidación y gravedad específica
- Obtener valores de propiedades de plasticidad mediante las simulaciones de los ensayos previamente descritos, así como valores mecánicos de cada muestra geológica.
 - Determinar los modelos numéricos, parámetros y modelación de las arcillas derivado de los ensayos de laboratorio.
 - Determinar una vez recopilados todos los resultados, los elementos mineralógicos que inciden directamente en las propiedades mecánicas de las arcillas.

Variables de estudio

- Elementos mineralógicos de las arcillas. (Variable Independiente, Cuantitativa.)
 - Los indicadores de la variable independiente son:
 - Minerales asociados a la formación geológica.
 - Presencia porcentual de minerales asociados en dicha formación.
- Propiedades mecánicas de las arcillas. (Variable dependiente, Cuantitativa y Cualitativa.)

- Los indicadores cualitativos de la variable dependiente son:
 - Color
 - Olor
 - Textura

- Los indicadores cuantitativos de la variable dependiente son:
 - Resistencia al corte
 - Humedad específica
 - Límites plásticos
 - Cohesión
 - Fricción interna
 - Consolidación

Fases de desarrollo de la investigación

- **Fase preliminar:** Análisis documental, basado en los ensayos e información que se pueda recopilar en laboratorios de suelos con respecto a las propiedades mecánicas de las arcillas.

- **Fase experimental:** Análisis cualitativo basado en los resultados de las pruebas de laboratorio y comparación de valores obtenidos en cada una de las muestras previamente clasificadas geológicamente. Los aspectos a evaluar son:
 - **Tamaño:** Todos los suelos tienen partículas de tamaño variable, es decir que hay partículas de distinto tamaño. Esto conduce de inmediato al análisis de la composición granulométrica. (Nadeo & Leoni, Introducción a algunas propiedades fundamentales de los suelos, 1997).

- **Rugosidad:** Esta característica sólo podría tener importancia, a simple vista, dado el caso de las partículas que no sobrepasan el tamiz 200. En realidad, su importancia es secundaria dado que los granos naturales son por lo general rugosos derivado del estado en que se encuentran. (Nadeo & Leoni, Introducción a algunas propiedades fundamentales de los suelos, 1997)
- **Color:** determinado por simple inspección al momento de tomar la muestra.
- **Fase final:** Análisis cuantitativo y comparativo de los resultados obtenidos en laboratorio para la comparación entre muestras de arcilla, se deben tomar en cuenta los resultados de las mediciones de todos los parámetros físico – mecánicos evaluados.

Técnicas de análisis de información

- Análisis multivariado: se elaborará un análisis discriminante cuya finalidad es describir las diferencias entre las formaciones geológicas sobre lo observado en las muestras de arcilla evaluadas. En caso de que las diferencias existan, se explicará en qué sentido variará incluir en futuras investigaciones otros grupos geológicos. De ser necesario se realizarán regresiones lineales para ampliar las conclusiones del estudio.
- Análisis de correlaciones: De ser el caso que las variables estén relacionadas y no se pueda establecer cuál es la responsable, se utilizarán el método de correlación, el cual desde la perspectiva

inicial de la investigación es la que demostrará los resultados finales del estudio.

INTRODUCCIÓN

La presencia de arcilla en las diferentes obras de ingeniería puede afectar las mismas hasta llevarlas al colapso. Al momento de cimentar una obra sobre estratos arcillosos, estas pueden causar asentamientos diferenciales que afecten estructuralmente la construcción de manera leve o bien en grandes magnitudes, depende de las propiedades del suelo arcilloso. Estas varían según su formación geológica y del grado de saturación de la misma al momento de construir los cimientos.

La investigación completa de la composición química de un mineral o roca incluye: primero, la identificación de los elementos presentes por análisis cualitativo; segundo, la determinación de las cantidades relativas de cada uno por análisis cuantitativo; por último, se podrá calcular la fórmula.

Ambos procesos, para llevarse a cabo en forma completa, requieren el equipo de un laboratorio químico. Un análisis cualitativo aproximado, sin embargo, puede, en muchos casos, hacerse rápida y, sencillamente con unos cuantos accesorios. (Chupina de León, 2006)

No es la finalidad de esta investigación deducir la fórmula, pero sí determinar la presencia de los diferentes elementos que conforman las arcillas, si se conoce el contenido de éstos en el mineral arcilloso, se hace uso de técnicas ya establecidas para la determinación cuantitativa del porcentaje de los elementos contenidos y realizar una comparación entre ellos, para determinar cuál es el grupo al que pertenecen.

La composición de la arcilla determina también sus propiedades mecánicas, es decir, que depende de la misma, su respuesta ante diversas situaciones a la que puede someterse el suelo varía según del grupo geológico en el que se encuentra.

Al momento de esta investigación no existe referencia alguna sobre la incidencia de la formación geológica de la roca, en el comportamiento mecánico de la misma, al ser sometida a fuerzas inducidas por obras civiles o geotécnicas, por lo que se obtendrán muestras de arcilla en tres formaciones geológicas ampliamente distribuidas en la república de Guatemala; para luego someterlas a ensayos de caracterización mineralógica y ensayos físico-mecánicos en laboratorio, con los que se podrá predecir el comportamiento mecánico, soporte del material, forma de estabilización y tratamiento del mismo; la referencia principal es la región o zona geológica en la cual el material es encontrado o extraído.

La síntesis de la investigación se presenta a continuación:

Capítulo 1	Capítulo 2	Capítulo 3	Capítulo 4
<ul style="list-style-type: none"> •Generalidades de las arcillas •Descripción General de propiedades químicas y mecánicas de las mismas. 	<ul style="list-style-type: none"> •Entorno Geológico Regional (Bloque Chortí) •Geología de arcillas seleccionadas dentro de la investigación 	<ul style="list-style-type: none"> •Análisis Químico Mineralógicos •Análisis Físico - Mecánicos •Interpretación de resultados 	<ul style="list-style-type: none"> •Presentación y discusión de resultados. •Comparación de resultados y propuestas de estabilización de suelos arcillosos

Fuente: elaboración propia.

1. GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS

Las arcillas son agregados de partículas microscópicas derivadas de la composición química causada por la meteorización de las rocas. Son suelos plásticos cuando se ven afectados por la humedad y suelos duros cuando están secos (Terzaghi & Peck, 1973).

1.1. Definiciones de arcilla

La definición de arcillas varía de las siguientes maneras.

- En mineralogía las arcillas envuelven a un grupo de filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen del tamaño de grano y formación estructural (Chupina de León, 2006, pág. 1)
- Desde el punto de vista petrológico, la arcilla conforma rocas sedimentarias, originados en su mayoría por detritos, con características bien definidas. Arcilla también es un término granulométrico, situado en granos finos con un tamaño menor a 1/16 mm. (Chupina de León, 2006, pág. 1)
- Para la industria de la cerámica, se utiliza como materia prima que al mezclarla con agua en la proporción correcta crea una solución plástica y al calcinar se solidifica formando ladrillo, tabletas o vasijas. (Chupina de León, 2006, pág. 2)

- Desde el punto de vista económico, son materia prima industrial con diversas propiedades mineralógicas y genéticas y con distintas propiedades tecnológicas y aplicaciones. (Chupina de León, 2006, pág. 2)

De lo anteriormente expuesto, se puede concluir que las arcillas no sólo tienen connotaciones mineralógicas, sino también de tamaño de partícula, por lo tanto se consideran arcillas las partículas granulométricas de proporciones menores a 1/16 (0.0625) mm. (Chupina de León, 2006). Adicionalmente, su aporte a la economía se centra en la propiedad de plasticidad de la misma, convirtiéndola en materia prima para la industria cerámica.

“Generalmente, se define a las arcillas como rocas sedimentarias compuestas de uno o varios minerales, ricas en silicatos hidratados de aluminio, hierro o magnesio, alúmina hidratada u óxido férrico, con predominio de partículas de tamaño coloidal o casi coloidal, dotada comúnmente de plasticidad cuando está suficientemente pulverizada y humedecida, rígida cuando está seca y vítreo cuando se calcina a suficiente temperatura”. (Chupina de León, 2006, pág. 2)

En geotécnia se define a las arcillas como: “materiales geotécnicamente problemáticos al depender su comportamiento de su formación mineralógica” (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002, pág. 93), definición que adoptaremos como principal para la presente investigación.

1.2. Naturaleza química de las arcillas

“El estudio mineralógico de las arcillas mediante las técnicas de rayos X y de petrografía muestra que están constituidas principalmente por minerales

cristalinos claros y diversas cantidades de material no cristalino.” (Chupina de León, 2006, pág. 2)

Los principales elementos químicos constituyentes de las arcillas son átomos de silicio, aluminio, hierro, magnesio, hidrógeno y oxígeno. El análisis químico de las arcillas indica que los principales compuestos que contienen SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, y H₂O y cantidades variables de otros óxidos como: TiO₂, CaO, MgO, MnO, K₂O, Na₂O y P₂O₅, más los grupos hidroxilos. (Chupina de León, 2006)

Los patrones de construcción de los distintos minerales arcillosos son de forma definida como el tetraedro (cuatro lados) y el octaedro (ocho lados). Los estudios mineralógicos han clasificado las arcillas con base a datos de estructura y composición en cinco grupos.

Chupina de León (2006) presenta en la Tabla I, la clasificación de las arcillas según su estructura. Los conceptos principales de la misma serán tratados en la sección 1.1.6. del presente capítulo.^[SC1]

[SC2]

Tabla I. **Clasificación de arcillas según su estructura.**

	A. Cristalino	B. Amorfo
1. Grupo del caolín	X	
2. Grupo de la montmorillonita	X	
3. Grupo de la illita o hidrómica	X	
4. Grupo de la attapulgita-sepiolita	X	
5. Grupo de la alófana		X

.Fuente: (Chupina de León, 2006, pág. 3)

“La estructura del material se estudia en tres niveles, la macro estructura del mismo, o sea, la composición que se ve a simple vista; su microestructura, es decir, la composición que se ve en un microscopio óptico y, la estructura interna de las sustancias que componen el material a nivel iónico-molecular, estudiada recurriendo a los métodos del análisis por rayos X, microscopía electrónica, etc.” (Van Olphen, 1977, pág. 66)

La composición química de las arcillas permite tener una idea acerca de una serie de propiedades tales como la resistencia al fuego, estabilidad biológica, las características mecánicas y otras características técnicas. Ésta composición resulta cómodo expresarla mediante la cantidad de óxidos, en porcentaje, que éstos contienen. Los óxidos básicos y ácidos están vinculados químicamente entre si y dan lugar a la formación de minerales que definen muchas de las propiedades del material. (Mattauer, 1976, pág. 91)

1.3. Propiedades físicas, químicas y mecánicas de las arcillas

“Las arcillas se emplean como materiales de ingeniería debido a su resistencia mecánica, dureza, resistencia al calor y a la corrosión elevada, así como a sus propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas deseables” (Chupina de León, 2006, pág. 4); sin embargo, su propiedad predominante es la plasticidad, lo que la convierte en un elemento no deseable al encontrarla en estratos de suelo previo a una cimentación u obra geotécnica similar, su capacidad de absorción provoca que al estar saturado el estrato y cimentar sobre el mismo, produzca asentamientos en las obras de ingeniería.

“El discernimiento relacionado a la estructura de un material de construcción, como es el caso de la arcilla, es indispensable para comprender

sus propiedades y, en definitiva, para resolver el problema práctico de dónde y cómo utilizarlo a fin de conseguir el mayor efecto económico-técnico.” (Compton, 1970, pág. 142)

“Una gran ventaja de las arcillas es que con frecuencia son resistentes al ataque químico por gases, líquidos e incluso materiales fundidos a elevada temperatura. Ello, combinado con su extraordinaria resistencia a la alta temperatura, las hace adecuadas para aplicaciones como recubrimientos resistentes a la temperatura para hornos (refractarios), aislantes e incluso como componentes mecánicos como discos y álabes de turbinas, así como componentes diversos para máquinas de combustión interna.” (Chupina de León, 2006, pág. 4)

Las aplicaciones industriales primordiales de dichos minerales residen en sus características físico-químicas. Mismas que derivan, principalmente, de su extremado pequeño tamaño de grano y las interinidades isomorfas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y en la existencia de cationes ligados de forma pobre en el espacio interlaminar (Chupina de León, 2006, pág. 5). Como consecuencia de lo anteriormente expuesto, las arcillas por partes considerable presentan, un gran valor del área de contacto superficial en su formación química.

Por ello pueden interactuar con numerosas sustancias, en particular agregados polares, que se comportan de forma plástica en mezclas agua-arcilla con grandes proporciones sólido/líquido y son capaces en varias ocasiones de inflar, en base a sus propiedades reológicas en suspensiones líquidas. (Cornelius & Cornelius, 1981)

Además, la carga existente en las láminas se indemniza, tal como se indicó con anterioridad, incursionando en el sitio interlaminar de cationes ligados con

debilidad y su estado de hidratación variado, que pueden ser intercambiados fácilmente mediante establecer contacto de la solución saturada junto a la arcilla en diversos cationes, esta propiedad se conoce como la capacidad de reciprocidad catiónica y es conocida como base de múltiples aplicaciones industriales. (De Pablo, 1964)

“La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales como superficie específica y porosidad; se mencionan dos tipos de procesos que de forma regular ocurren de forma aislada: absorción, relacionada de forma directa a varios procesos físicos como la retención por capilaridad, y adsorción, cuando existe una interacción de tipo químico entre el líquido o gas adsorbido y el adsorbente, para esta investigación la arcilla, denominado adsorbato.” (Chupina de León, 2006)

Las arcillas son predominantemente plásticas. “Dicha propiedad ocurre porque el agua forma una cubierta sobre las partículas laminares creando un efecto resbaloso que propicia el deslizamiento de las partículas sobre otras cuando se despliega un esfuerzo las mismas. La dominante plasticidad de las arcillas es producto, reiteradamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño o elevada área superficial y alta capacidad de hinchamiento.” (Ramos Ramírez, 2002, pág. 88)

“La tixotropía se define como el fenómeno consistente en la pérdida de resistencia del fluido, al mezclarlo, y su recuperación rezagada con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas cuando son friccionadas se convierten en un auténtico líquido. Si, a continuación, se las deja descansar recobran 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.

Sin embargo, respecto a su límite plástico no hay posibilidad de comportamiento tixotrópico.” (Chupina de León, 2006)

Chupina de León (2006) comenta que las propiedades básicas y especiales de los materiales de las arcillas pueden dividirse en los siguientes grupos, se consideran aquellos efectos sobre estos debidos a la manera de explotarse.

También expresa que los parámetros del estado y características estructurales que definen las propiedades técnicas son la composición química, mineral y de fase; características específicas de viscosidad, masa y concentración volumétrica, porosidad y la dispersidad de los materiales pulverulentos.

- “Las arcillas cuentan con propiedades físicas, químicas y mecánicas, las cuales se estiman recurriendo a índices numéricos establecidos a través de ensayos dentro a los estándares. En Guatemala, se siguen las normas de la American Society for Testing and Materials, ASTM.
- Propiedades físicas: propiedades reológicas de la arcilla ya que posee plasticidad y viscosidad; propiedades hidrofísicas, físico-térmicas, acústicas, eléctricas que establecen la cualidad del mineral respecto a diferentes proceso físicos; estabilidad contra la corrosión física resistencia al frío, a la radiación, al agua.
- Propiedades mecánicas: que se refieren al proceder del material al someterlo a la acción deformativa y destructiva de cargas mecánicas - resistencia mecánica, dureza, elasticidad, plasticidad, fragilidad.

- Propiedades químicas: capacidad para las transformaciones químicas, estabilidad contra la corrosión química.
- Durabilidad y seguridad, fiabilidad.” (Chupina de León, 2006, pág. 7)

1.4. Geología general de las arcillas

Pettijhon (1979) presenta que las arcillas pueden producirse por diferentes procedimientos, descritos textualmente a continuación:

- a) Hidrólisis e hidratación de una arcilla (agua + silicato alcalino → silicato aluminico hidratado + hidróxido alcalino).
- b) Disolución de una caliza u otra roca que sujete deterioros de arcilla relativamente abstrusas que quedan como sobrante.
- c) Acción de los agentes atmosféricos sobre las lutitas (rocas sedimentarias ricas en arcillas).
- d) Sustitución de una roca por arcilla invasora y transporte de los elementos de la misma de forma parcial o total por el fluido.
- e) Almacén de arcilla arrastrada por el agua en cavidades o venas.

La descripción general de dichos procesos se amplía en la sección 1.5.1. del presente documento.

“La acción de los agentes atmosféricos y otros procesos afines pueden operar en todos los casos arriba indicados y evidentemente han predominado en

la formación de arcilla durante la época geológica, pero las soluciones acuosas calientes elevándose de rocas ígneas en vías de solidificación pueden desempeñar un papel importante en los procesos 1 y 4. Las arcillas pueden producirse a profundidades considerables gracias a esas alteraciones hidrotermales, en tanto que los yacimientos debidos a la acción de los agentes atmosféricos en la superficie no se forman a profundidades mayores que aquellas a las cuales pudieran circular las aguas superficiales en la época en que se produjo la meteorización.” (Pettijohn, 1979, pág. 137)

En muchos yacimientos la arcilla ha sido trasladada, después de la acción de los agentes atmosféricos, por gravedad, por el viento, las corrientes de agua, las olas o el hielo, y han sido depositadas en lechos, capas y bolsas dentro de otras rocas sedimentarias. Algunos yacimientos, como los de bentonita, representan una alteración en gran escala, posterior al depósito, de capas estratificadas.

Después de depositarse las arcillas, pueden ser alteradas, poco o radicalmente, por soluciones que se llevan sílice o que introducen compuestos beneficiosos o perjudiciales. Puede haber situación de iones, fomento de la cristalización o establecerse las condiciones para una recristalización. Tal vez se desarrolle un mineral arcilloso distinto de otro preexistente durante esos cambios diagenéticos posteriores a la formación del depósito. (Bateman & Jensen, 1981)

Las arcillas y las lutitas se presentan en rocas de todas las edades, desde la era Paleozoica hasta el período actual de la era Cuaternaria, la mayoría de los yacimientos no consolidados arrastrados por las corrientes de agua y los vientos son de origen reciente o no muy antiguos. (Ralph, 1968)

1.5. Condiciones y factores ambientales relacionados con la formación de minerales arcillosos durante el proceso de meteorización

1.5.1. Erosión química

Se puede decir que esta erosión es la gran generadora de suelos finos y fundamentalmente de las arcillas. Dentro de este campo se puede mencionar a las siguientes:

1.5.1.1. Hidratación

“Resulta como consecuencia de la adición de agua a un compuesto químico para formar como conclusión otro compuesto químico.” (Nadeo & Leoni, Introducción a algunas propiedades fundamentales de los suelos, 2011, pág. 5). La mejor forma de medir la hidratación en una arcilla es por medio del cambio de volumen que la misma presenta.

1.5.1.2. Hidrólisis

“Es la descomposición química de una sustancia por medio del agua, se produce como efecto de que el agua libre, de los climas tropicales de intensa pluviosidad, donde las rocas están formadas fundamentalmente de Silicatos y Óxidos de Fe y Al, el agua libre afloja la ligazón con estos elementos y provoca su descomposición.” (Nadeo & Leoni, Introducción a algunas propiedades fundamentales de los suelos, 2011, pág. 5). Los efectos se pueden medir por el grado de descomposición que presentan así como por cambios físicos tales como el cambio de color predominante en la oxidación.

1.5.1.3. Disolución

“Aun cuando la Disolución es un fenómeno físico, en la erosión de los suelos y rocas, actúa casi siempre acompañado de una importante combinación y transformación química, por lo tanto, se lo encuadra en este tipo de fenómenos.” (Nadeo & Leoni, Introducción a algunas propiedades fundamentales de los suelos, 2011, pág. 6)

“Si bien las formaciones calcáreas (roca caliza) son en general poco solubles en agua, (0,065 gr/litros) cuando en el agua de contacto está presente al anhídrido carbónico, el carbonato de calcio es disuelto lentamente en forma de bicarbonato de calcio que puede llegar a una concentración en agua de 160 gr/litros.” (Nadeo & Leoni, Introducción a algunas propiedades fundamentales de los suelos, 2011, pág. 6)

1.5.1.4. Oxidación

La oxidación que sufren los óxidos ferrosos liberados debido a la hidrólisis, los lleva a transformarse en óxidos férricos. (Nadeo & Leoni, Introducción a algunas propiedades fundamentales de los suelos, 2011, pág. 6). De la definición anterior se puede afirmar que la coloración de las arcillas depende del grado de oxidación y meteorización que haya sufrido la roca a lo largo del tiempo.

1.5.2. Erosión *In Situ*

Para que la erosión química pueda llevarse a cabo se necesitan factores físicos que provoquen las reacciones necesarias y modificar la estructura de las arcillas, los procesos de erosión físicos son los siguientes:

1.5.2.1. Temperatura

El efecto causado por el calentamiento de la roca por la radiación solar es alto, lo que genera un aumento considerable de la temperatura del macizo, para posteriormente en horas de la noche alcanzar temperaturas muy bajas de forma brusca, provoca que entre la parte superficial e interna de la roca se produzca un gradiente térmico que dilata la misma y genera fisuras que con la reincidencia del proceso terminan fracturando y meteorizando la roca. (Nadeo & Leoni, Introducción a algunas propiedades fundamentales de los suelos, 2011)

1.5.2.2. Crecimiento de cristales

“El efecto se encuentra en las rocas agrietadas, o microfisuradas ya que la penetración del agua libre que luego por la acción de un cambio de temperatura puede congelarse, provoca grandes esfuerzos de compresión en la grieta que la contiene, se logra con ello ensanchar y desgastar a las paredes de la misma.” (Nadeo & Leoni, Introducción a algunas propiedades fundamentales de los suelos, 2011, pág. 4)

1.5.2.3. Tensiones de la corteza terrestre

“Son todos los movimientos que se generan tales como los terremotos y que, además, provocan la formación de diaclasas, plegamientos, etc.” (Nadeo & Leoni, Introducción a algunas propiedades fundamentales de los suelos, 2011, pág. 4)

En Guatemala existen tres grandes placas que generan dichas tensiones, la Placa del Caribe, Placa de Norteamérica y Placa de Cocos; las mismas se presentan con amplitud en el capítulo 2 de la presente investigación.

1.5.2.4. Efectos de gravedad

Derivado de los procesos anteriormente descritos, la gravedad actúa como un detonante relacionado a los desprendimientos de zonas altamente meteorizadas, esto provoca que las caídas reduzcan el tamaño de los bloques o bien, el cambio de su forma y composición al mezclarse con otro tipo de roca que se encuentra debajo del bloque desprendido.

1.6. Clasificación y nomenclatura de las arcillas

El interés geotécnico de las arcillas contempla dos clasificaciones principales, las mismas parten de los grupos estructurales para dividirse en:

1.6.1. Clasificación de arcillas según su origen

“Los estudios mineralógicos han clasificado las arcillas en base a datos de estructura y composición en cinco grupos” (Perez Bol & Toledo Sosa, 1987). A su vez los cinco grupos se dividen en dos grandes grupos principales, Cristalinos y Amorfos, tal como se describe en la Tabla I., sección 1.2.

Los minerales de arcilla de los grupos descritos en la Tabla II, describen los grupos arcillas junto a su composición química, ocurrencia y origen describiéndolos ampliamente a continuación:

Tabla II. **Clasificación de las arcillas según su origen.**

	Grupo	Composición química	Origen	Ocurrencia
A.	Caolín			
1.	Caolinita	$Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4$	H, M	Arcillas de china, bajo mantos de carbón, roca encajante, suelos.
2.	Dickita	$Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4$	H	Roca encajante
3.	Nacrita	$Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4$	H	Roca encajante
4.	Anauxita	$Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4$	M	Suelos
5.	Halloysita	$Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4$	H, M	Suelos
6.	Endelita	$Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4 + 2H_2O$	M	Suelos
B.	Montmorillonita			
1.	Montmorillonita	$Mg_2 Al_2 Si_{24} O_{60}(HO)_{12} NA_2, Ca$	M	Suelos, Bentonita, Tierras de batan
2.	Nontronita	$Fe^{III} Si_{22} Al_2 O_{60}(HO)_{12} NA_2, Ca$	H	Venas o vetas
3.	Saponita	$Mg_{18} Si_{19} Al_2 O_{60}(HO)_{12} NA_2$	H	Venas o vetas
4.	Beidelita	$Al_{13} Si_{19} Al_5 O_{60}(HO)_{12} NA_2$	H	Material molido dentro de fallas
5.	Hectorita	$Li_2 Mg_{16} Si_{24} O_{60}(HO)_{12} NA_2$	M	Arcillas
C.	Illita o Hidromicas			
1.	Illita	$(OH)_4 K_2 (Si_6 Al_2) Al_4 O_{20}$	M	Suelos, arcillas marinas, bajo mantos de carbón
D.	Attapulgita o Sepiolita			
1.	Attapulgita	$Mg_5 Si_8 O_{20} (OH)_4 4H_2O$	M	Tierras de batan
2.	Sepiolita	$Mg_5 Si_8 O_{20} (OH)_4 nH_2O$		
E.	Alófana	$Al + SiO_2 + H_2O$	M	Arcillas, suelos

Fuente: (Perez Bol & Toledo Sosa, 1987, pág. 3)

1.6.1.1. Grupo del Caolín

“La caolinita y en menor grado la haloisita, son los minerales más abundantes del grupo del caolín” (Perez Bol & Toledo Sosa, 1987, pág. 41), haciéndolas las más utilizadas en la industria cerámica.

“La caolinita suele producirse por la hidrólisis del feldespato y de otros silicatos por la acción de aguas hidrotermales al elevarse a la superficie o por la meteorización de las rocas, principalmente ígneas ácidas en la superficie.” (Perez Bol & Toledo Sosa, 1987, pág. 41)

1.6.1.2. Grupo de la Montmorillonita

“Los minerales de este grupo se han formado por descomposición superficial de rocas por agentes atmosféricos, por procesos hidrotermales a baja temperatura, por alteración de cenizas volcánicas en capas estratificadas por la acción de aguas circulantes a lo largo de fracturas o vetas.” (Perez Bol & Toledo Sosa, 1987, pág. 41)

La bentonita, arcilla representativa de este grupo, es el resultado de la alteración de cenizas volcánicas por diferentes procesos. (Perez Bol & Toledo Sosa, 1987)

1.6.1.3. Grupo de la Illita – Hidrómica - Halloysita

“Estos minerales se caracterizan porque tienen potasio y propiedades semejantes a las de la mica moscovita, poco es lo que puede decirse sobre las condiciones en que se produce la Illita, pero probablemente procede de la

montmorillonita por fijación de potasa absorbida.” (Perez Bol & Toledo Sosa, 1987, pág. 41)

1.6.1.4. Grupo de la Attapulguita y Sepiolita

“La Attapulguita es el único de los minerales arcillosos por su estructura reticular en forma de cadena, a diferencia de las formas laminares y hojosas de los anteriores grupos. Esta es una arcilla rica en Magnesio.” (Perez Bol & Toledo Sosa, 1987, pág. 41)

“La Sepiolita, es también un silicato de Magnesio, hidratado fibroso que se asemeja a la attapulguita. Este mineral arcilloso es intermedio entre la magnesia y alumina, se presenta asociada a la Serpentina, la magnesita y el ópalo, menos común en depósitos ferrosos.” (Perez Bol & Toledo Sosa, 1987, pág. 42)

1.6.1.5. Grupo de la Alófana

“Es una solución sólida y amorfa de sílice, alúmina y agua.” (Perez Bol & Toledo Sosa, 1987, pág. 42) A diferencia del grupo de los cristalinos, la alófana no presenta una forma definida o laminar como la mayoría de las arcillas, lo que la hace única en su grupo.

1.6.2. Clasificación de arcillas, según su uso

Los usos de las arcillas comercial e históricamente se dividen en dos grupos principales, los usos cerámicos y no cerámicos. La mayor parte del uso se inclina a la industria cerámica, sin embargo, los usos no cerámicos son igualmente importantes y de interés geotécnico principalmente.

A continuación en la Tabla III, se presentan los usos, aplicaciones y tipos de arcilla que forman los grupos mencionados.

Tabla III. **Clasificación de las arcillas, según su uso**

A.	USOS CERÁMICOS	APLICACIONES	TIPOS DE ARCILLA PRINCIPAL
1.	Productos Estructurales	Ladrillos, bloques, tubos de cerámica, tejas, terracota, losetas, baldosas, otros productos similares.	Arcillas comunes, arcillas rojas, caolinitas, lutitas, arcillas de bola.
2.	Porcelanas	Porcelana china, vajillas, loza, gres, loza sanitaria.	Caolines y Arcillas de bola.
3.	Refractarios	Ladrillos refractarios, aislantes eléctricos, equipos de laboratorio, cementos refractarios.	Alto porcentaje de caolín con cuarzo libre, arcilla bauxítica y de diásporo.
B.	USOS NO CERÁMICOS		
1.	Arcillas decolorantes	Decoloración de aceites vegetales y animales, comestibles, refinación de petróleo.	Tierras de batán, attapulguita, montmorillonita.
2.	Arcillas absorbentes	Usadas básicamente como portadores inertes de insecticidas.	Attapulguita y sub-bentonita.
3.	Arcillas de relleno	En industrias de pintura, papel, caucho, textiles, linóleo, fertilizantes y otros.	Caolín sedimentario y residual.
4.	Pigmentos	Industrias de papel y caucho.	Caolín sedimentario y residual.
5.	Matriz de fundiciones	Metalurgia.	Arcillas caoliníticas.
6.	Lodos de perforación	Industria petrolera, minería y perforación en general.	Bentonitas.
7.	Cementos	Portland y cemento blanco.	Caolines y Arcillas de bola.
8.	Usos varios	Cohetería, medicina y otros.	Caolines y arcillas absorbentes.

Fuente: (Perez Bol & Toledo Sosa, 1987, pág. 7)

1.7. Análisis geotécnico de las arcillas

“Las arcillas son materiales geotécnicamente problemáticos al depender su comportamiento de la composición mineralógica y de las condiciones geoquímicas y ambientales del medio.” (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002, pág. 93)

Al sufrir alteraciones en su composición las arcillas tienden a cambiar sus propiedades físico-mecánicas y entonces se produce el cambio en el tratamiento geotécnico de las mismas.

“La composición mineralógica de las arcillas es la que mayor influencia ejerce sobre las propiedades geotécnicas como la plasticidad, resistencia, compresibilidad, cambio de volumen, etc.” (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002, pág. 93)

1.7.1. Propiedades físico-mecánicas

Las principales propiedades de las arcillas dependen de su formación mineralógica y composición química; tal como se indica en el capítulo 1.6., los grupos dependen de la cantidad y porcentajes de elementos químicos en su estructura.

Para el interés geotécnico las primordiales propiedades a evaluar y que afectan directamente el desarrollo de obras de construcción, estabilización y uso de suelo se describen a continuación.

1.7.1.1. Plasticidad

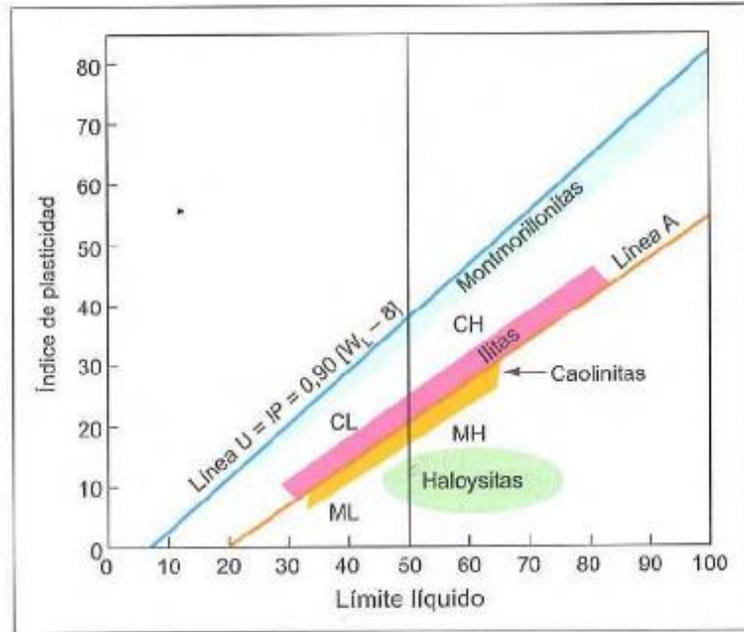
“Es la propiedad más notable de las arcillas. Propiedad que adquieren cuando se mezclan homogéneamente con agua en proporciones definidas.” (Perez Bol & Toledo Sosa, 1987, pág. 42)

“El mecanismo de plasticidad en las arcillas puede explicarse mediante la premisa de que las arcillas se componen de partículas en forma de hojuelas o laminares, que están incluidas en envolturas de agua cuando la arcilla está en estado plástico y que la calidad depende de dichas envolturas de agua”. Es evidente la relación inversa entre la plasticidad y el tamaño de grano con el alto contenido de plasticidad en arcillas de grano fino. (Perez Bol & Toledo Sosa, 1987, pág. 42)

“Al mojar la arcilla seca, se percibe un olor característico de tierra mojada y el desprendimiento de calor. Las moléculas de agua (dipolos) se adentran entre las partículas lenticulares de caolinita y la acuñan provocando el hinchamiento de la arcilla. Las capas finas de agua entre las partículas estratiformes de minerales arcillosos condicionan las características de la pasta arcillosa.” (Chupina de León, 2006, pág. 9)

En estado húmedo, se moldea la arcilla a un estado deseable sin que aparezcan interrupciones ni grietas, y conservar la forma adquirida durante el proceso de secado y cocción. Se debe mencionar que la formación mineralógica de las arcillas influye de manera considerable en el índice de plasticidad de las arcillas tal como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. **Influencia de la composición mineralógica en la plasticidad**



Fuente: (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002, pág. 93)

1.7.1.2. Color

“El hierro es el agente colorante más común en las arcillas en bruto y rocas relacionadas” (Perez Bol & Toledo Sosa, 1987, pág. 43).

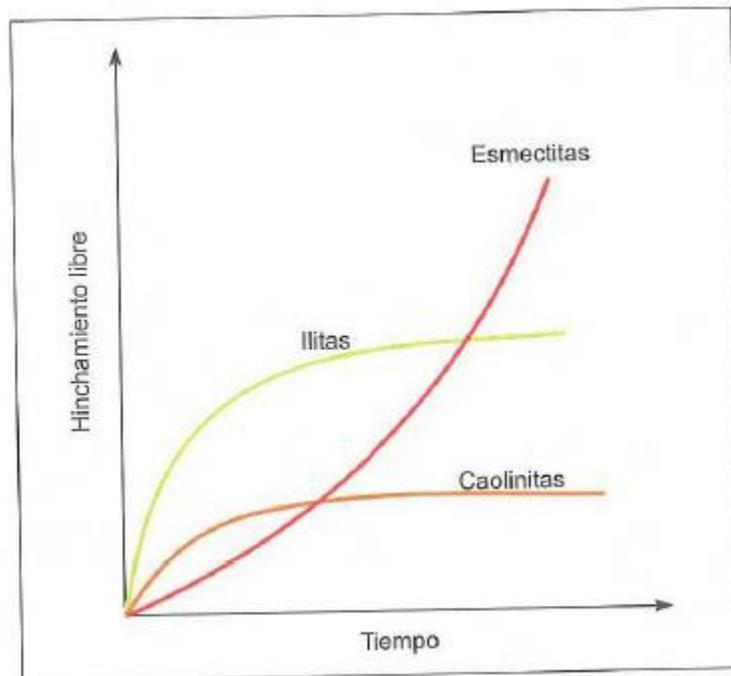
El color en las arcillas indica el grado de oxidación o descomposición al que han sido sometidas por los procesos erosivos, o bien, su origen, pues los colores oscuros, verdosos indican formación en medios reductores, colores rojos para medios oxidantes, colores amarillos para medios anaeróbicos y colores grises o negros cuando existe presencia de materia orgánica en la arcilla. Las arcillas blancas están exentas de impurezas colorantes.

1.7.1.3. Tamaño de partícula

El tamaño de partícula influye en varias propiedades, tales como la plasticidad, poder de secado e intercambio de base. Las arcillas de grano fino se caracterizan por un contenido elevado de agua y plasticidad. Estas arcillas finas tienen a ser muy plásticas y poseen gran resistencia en su estado seco, tienden a disminuir su tamaño, así como, a producir grietas. (Perez Bol & Toledo Sosa, 1987).

El cambio de volumen o tamaño de partícula, también se ve afectado por la formación mineralógica de la arcilla, tal como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. **Cambio de volumen en función de la formación mineralógica de las arcillas**



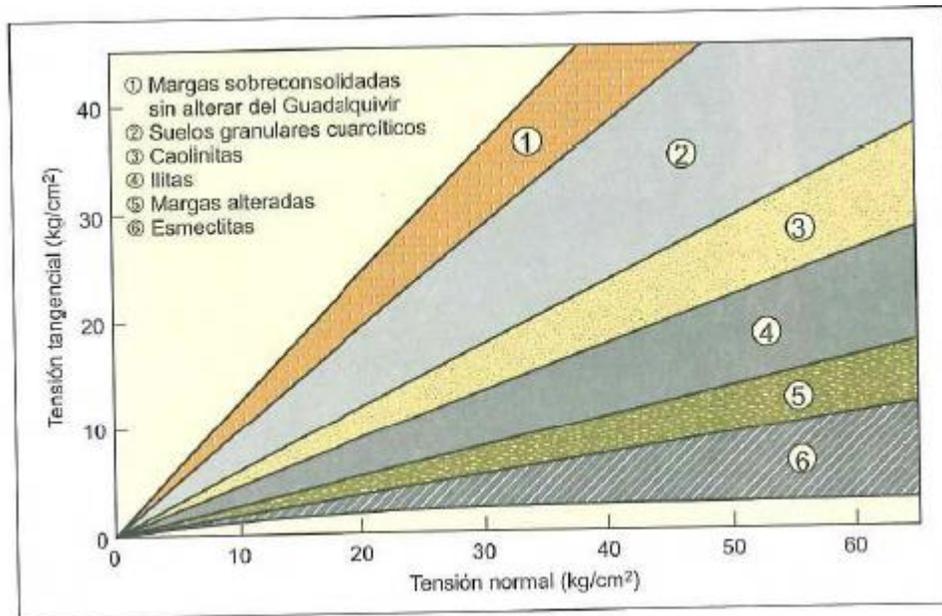
Fuente: (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002, pág. 94)

1.7.1.4. Resistencia

“La resistencia de los suelos arcillosos influye tanto el contenido de arcilla, como el tipo de mineral predominante” (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002, pág. 94).

Se puede determinar la resistencia a la tracción, flexión y compresión, en la práctica se realizan ensayos de laboratorio que determinan transversalmente el módulo de rotura. El grado de resistencia varía también por la influencia mineralógica de la formación a la que pertenecen las arcillas, que aparece en la Figura 3.

Figura 3. **Influencia de la mineralogía en la resistencia de las arcillas**



Fuente: (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002, pág. 94)

1.7.1.5. Porosidad y permeabilidad

Se define la porosidad como una relación entre el volumen de la pieza de arcilla y el volumen de sus poros; mientras que la permeabilidad es la relación entre el volumen de la pieza de suelo con el volumen de los poros interconectados. (Perez Bol & Toledo Sosa, 1987)

Los materiales formados por detritos tienen siempre una mayor porosidad obtenida en el proceso de sedimentación, mayor en los depósitos arcillosos que en los de tamaño de grano mayor (gravas y arenas), en arenas puede alcanzar el 50% de no estar compactados. Sin las arcillas poseen poros muy pequeños propiciado que el agua circule lentamente a través de ellos haciendo que su permeabilidad sea baja. (Madrid, 2014)

1.7.2. Ensayos de laboratorio

Las muestras de arcilla de la presente investigación, son de procedencia residual, para identificar las propiedades físico-mecánicas en formaciones de este tipo se realizaron los siguientes ensayos:

- Granulometría.
- Límites de Atterberg.
- Corte directo.
- Consolidación y gravedad específica.

La justificación técnica de la elección de dichos ensayos se encuentra en el inciso 4.2.4.1 de la presente y Tabla XLVI.

1.7.2.1. Granulometría

El análisis granulométrico es una prueba orientada a determinar las cantidades relativas de los múltiples tamaños de grano contenidos en una masa de suelo específica (Hernández C., 2008, pág. 73).

Para realizar el ensayo se calcula la cantidad de material que atraviesa un tamiz formado por una malla específica pero a su vez es retenido en un tamiz posterior, con malla de diámetros menores a la anterior. Es indiscutible que el mineral retenido en cualquier criba consiste en partículas de muchos tamaños, los cuáles son menores al tamaño de la malla anterior a la que pasó” (Hernández C., 2008, pág. 73).

En el caso de las arcillas por ser granos muy finos, se dice que son aquellos que pasan del tamiz 200 (malla de 0.0029”), por lo que se recomienda que para ellas se utilice el método de granulometría por sedimentación, así mismo, la granulometría indica el porcentaje de finos de la muestra, dato relevante en los otros ensayos que se realizan a la muestra.

1.7.2.2. Límites de Atterberg

“Son propiedades índices de los suelos, que definen la plasticidad y se utilizan en la clasificación e identificación de los mismos. *Atterberg* dividió y consideró tres límites o estados de consistencia: el límite de contracción que es la frontera convencional entre los estados sólido y semisólido, el límite plástico que es el límite entre los estados semisólido y plástico; y el límite líquido que se define como la frontera entre estado semilíquido y plástico. También se denomina al límite líquido como la divisoria entre el estado plástico y líquido” (Hernández C., 2008, pág. 47)

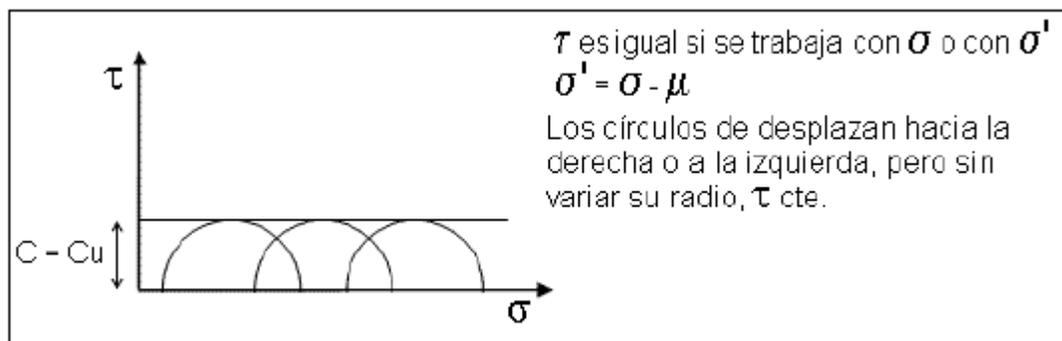
Los ensayos sobre límites están asociados directamente a la plasticidad de la arcilla, que tal como se mencionó en la sección 1.7.1.1., es la propiedad más notable de las arcillas.

1.7.2.3. Corte directo

Se elige el corte directo para la presente investigación, derivado de que al ser muestras alteradas, se puede manejar las resistencias y humedades de las pastillas en un corto tiempo. (Bimbela, 2014) Sobre las muestras remoldeadas de arcilla comenta: “Debido a lo poco factible que resulta realizar las pruebas en compresión simple, se optó a realizarlas en corte directo” refiriéndose a la metodología a emplear en sus ensayos sobre arcillas expansivas.

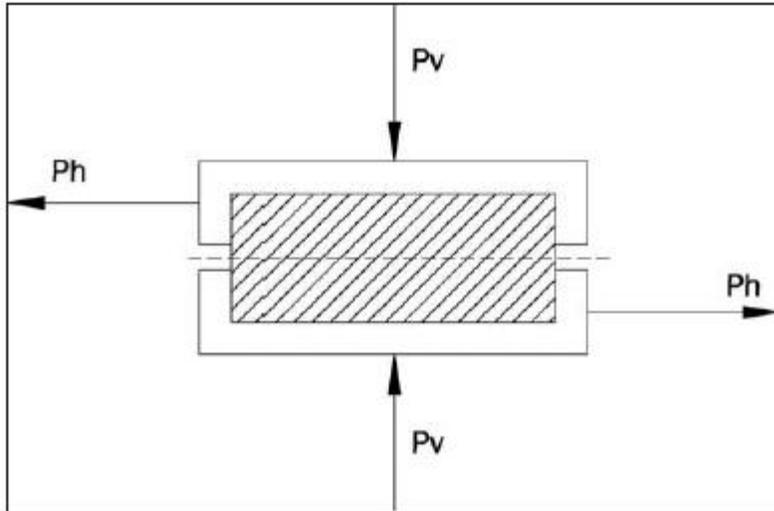
La teoría básica del ensayo de corte directo se resume en: “Un esfuerzo normal debido a una carga P_v aplicada externamente que genera una tensión normal σ_n ($\sigma_n = P_v / A$) y un esfuerzo cortante debido a la aplicación de una fuerza tangencial P_h , que desplaza la parte móvil de la caja produciendo la tensión de corte τ ($\tau = P_h / A$)” (Hernández C., 2008, pág. 274), y su representación gráfica se presenta en la Figura 5.

Figura 4. **Tendencia de las arcillas saturadas**



Fuente: (Hernández C., 2008, pág. 217)

Figura 5. Representación gráfica del ensayo de corte directo



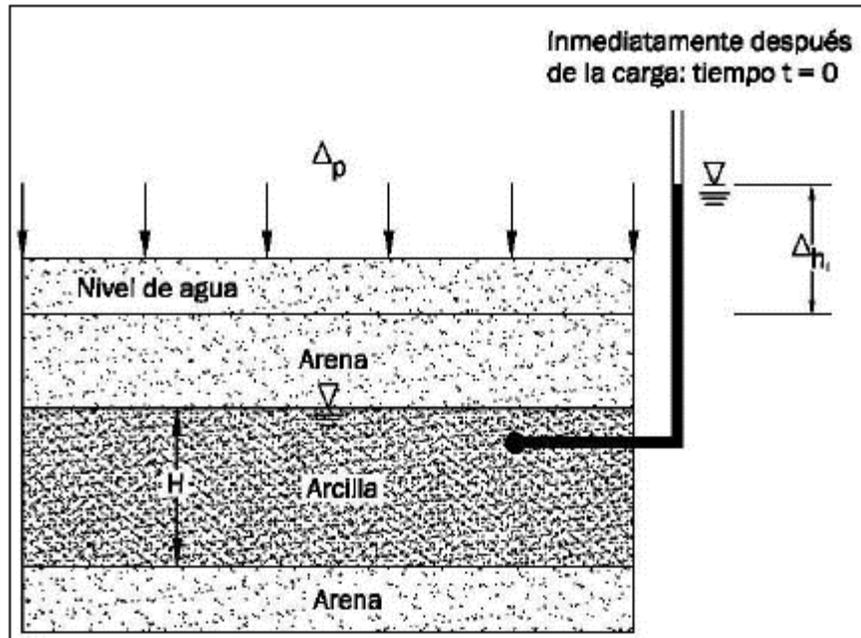
Fuente: (Hernández C., 2008, pág. 274)

1.7.2.4. Consolidación

“El objeto de una prueba de consolidación es encontrar la disminución de volumen y la intensidad con que produce dicho decremento, en un espécimen de superficie, sujeto a una carga axial y debidamente confinado.” (Hernández C., 2008, pág. 298).

Los principios fundamentales de la consolidación del suelo se muestran en la Figura 6.

Figura 6. Principios de la consolidación



Fuente: (Hernández C., 2008, pág. 300)

Debido a que la permeabilidad hidráulica de la arcilla es diminuta, se requerirá tiempo para que el incremento del esfuerzo se transfiera gradualmente a la estructura del suelo y el exceso de presión de poro del fluido se gaste. Si Δp es una sobrecarga en la extensión del terreno sobre un área extensa, el incremento del esfuerzo axial $\Delta \sigma$ en cualquier profundidad del estrato de arcilla será igual a Δp , o $\Delta \sigma = \Delta p$. (Hernández C., 2008), tal como se muestra en la Figura 6.

1.7.2.5. Gravedad específica

Debido a que la saturación de las arcillas es un factor detonante de sus propiedades es necesario realizar esta prueba para conocer el peso unitario de la muestra.

“El valor de la gravedad específica es necesario para calcular la relación de vacíos de un suelo, es utilizada en el análisis hidrométrico, es útil para predecir el peso unitario del suelo y sirve para graficar la recta de saturación máxima en el ensayo de compactación Proctor” (Hernández C., 2008, pág. 141).

En la Tabla IV, se muestran los valores de gravedad específica de los sólidos de algunos suelos, se destaca para esta investigación el de las arcillas inorgánicas.

Tabla IV. **Gravedad específica de los sólidos en algunos suelos**

Tipo de suelo	G_s
Arena	2.65 – 2.67
Arena limosa	2.67 – 2.70
Arcilla inorgánica	2.70 – 2.80
Yeso	2.60 – 2.75
Loes	2.65 – 2.73
Suelos con mica o hierro	2.75 – 3.00
Suelos orgánicos	Variable, puede ser inferior a 2.00

Fuente: (Hernández C., 2008, pág. 145)

1.7.3. Construcción en suelos arcillosos

Como consecuencia de las características químico - mineralógicas y físico-mecánicas de las arcillas, la importancia que las arcillas en los suelos alcanzan en las obras de construcción es alta, y nos permite identificar diversos efectos sobre ellas producidas de forma directa.

Bauzá (2006, pág. 23) clasifica los efectos de trabajar sobre un suelo arcilloso de la siguiente forma:

- a) "Perturbación de los procesos constructivos que se exterioriza en:
 - I. Dificultades en los drenajes,
 - II. Deterioro de trabajabilidad, y
 - III. Susceptibilidad a las condiciones meteorológicas desfavorables;
- b) Introducción de incertidumbres en la estimación de resistencias, debido a un incremento en las circunstancias de humedad el mismo suele repercutir en la disminución de resistencia del suelo, así como, el reblandecimiento de los mismos;
- c) Incremento de los movimientos diferidos o de consolidación debido a la dificultad para que el exceso de fluido sea eliminado en condiciones de modificación de cargas por su baja permeabilidad;
- d) Movimientos asociados a cambios volumétricos por diferencias de saturación, originados en su mayor parte por:
 - I. Artificiales, por la reliquidación de las humedades utilizadas en el proceso de construcción a las condiciones ambientales finales, o
 - II. Naturales, como variaciones del nivel freático o bien, en las condiciones atmosféricas del entorno;

- e) Deformaciones plásticas del asiento de las construcciones; y
- f) Erosión y degradación de su zona en condiciones extremas, manifestados por agrietamientos y superficies débiles característicos de ciclos de saturación y sequía, que afecta de forma negativa a su estabilidad y durabilidad.”

Las consecuencias más notables de las construcciones sobre suelos arcillosos se presentan en los asentamientos diferenciales, al no considerar los factores y propiedades mencionadas en este capítulo se pueden generar pérdidas considerables, tanto económicas como sociales, en construcciones que colapsan.

1.7.4. Estabilización en suelos arcillosos

Las evidencias muestran que la presencia de suelos arcillosos, comúnmente inexcusable, ocasiona diversas dificultades y riesgos sobre las obras civiles que el técnico o director de obras debe evitar o, al menos, minimizar. (Bauzá, 2006, pág. 28)

Bauzá (2006, pág. 28) comenta que la manera de proceder ante la presencia de materiales que causan problemas en el subsuelo se agrupan en tres extensos grupos de medidas, siempre y cuando sea inviable la posibilidad de cambiar la localización de la obra o que el costo sea superior a los efectos o daños a causar y se pueda evitar construir sobre el estrato arcilloso encontrado, estas son:

- a) La eliminación o sustitución de los materiales, de forma total o parcial, sustituyéndolos por materiales que se acomoden al proyecto;

- b) El tratamiento o modificación de los mismos a través de otros mecanismos que hagan mucho menos sensibles a la meteorización por elementos que empujan a comportamientos defectuosos; y
- c) La modificación de la tipología estructural que impide a dichos minerales arcillosos actuar de forma natural y así afectar las obras civiles.

Éstas soluciones, en su mayor parte, no eliminan de forma total los efectos adversos causados por las arcillas (Bauzá, 2006, pág. 28). Aplicar en su totalidad dichas soluciones se convierte en una acción costosa y poco productiva. Por ello, es importante prever dichas medidas como obras de prevención que acciones correctivas, mismas que se ejecutan la mayor parte del tiempo de forma combinada.

2. FORMACIONES GEOLÓGICAS INVESTIGADAS

En el presente capítulo, se amplía la información sobre las unidades geológicas, que fueron seleccionadas, se tiene como criterio principal la edad a la que representan; es la más antigua la era paleozoica, seguida por los periodos terciarios y cuaternarios, todas unidades distintas, con formaciones variadas y procesos de meteorización similares, aunque geográficamente se encuentran en la misma región, su formación es distinta.

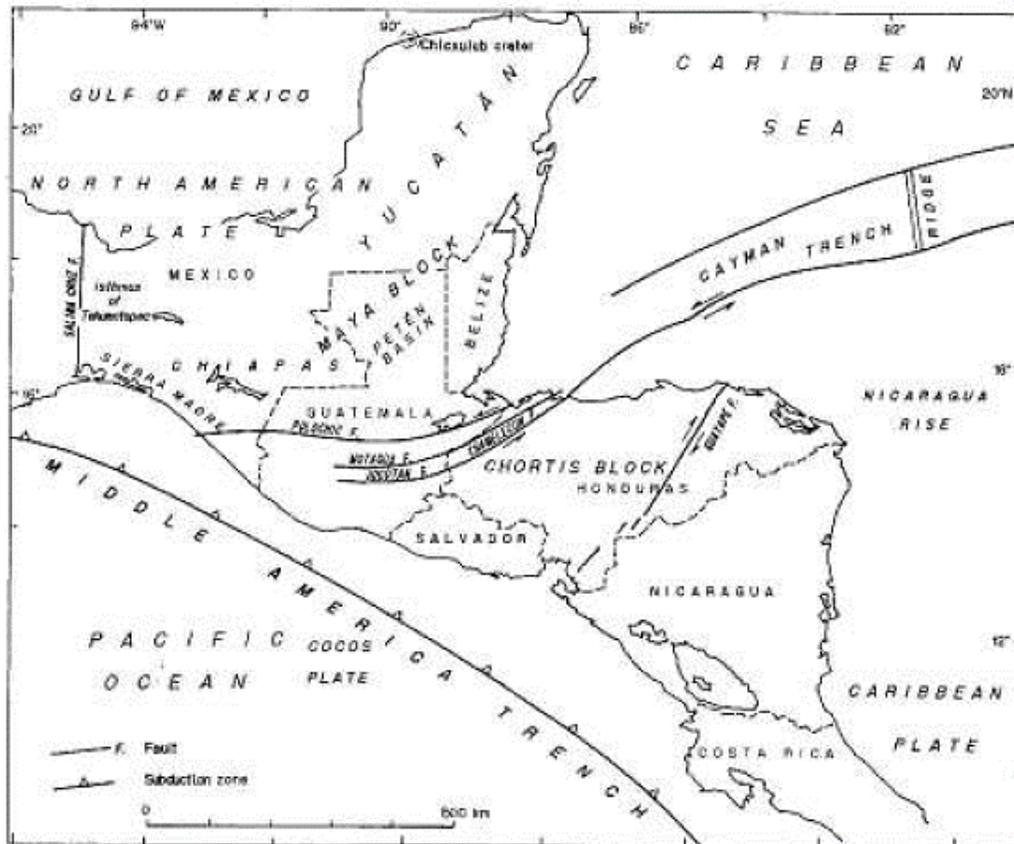
2.1. Ambiente tectónico de Guatemala

Guatemala se encuentra envuelta por el movimiento de tres placas tectónicas, que generan constante interacción entre sí, las mismas son las responsables de la alta sismicidad de área, son estas las Placas del Caribe, Cocos y Norte América.

“Las posiciones actuales de estas placas son las siguientes: la Placa Caribe esta insertada entre las dos Placas de Norteamérica y Sudamérica. Estas tres placas tienen en su límite Oeste la subducción Este-Pacífico, en esta zona (fosa), la Placa Pacífico (o la placa secundaria de Cocos) subduce bajo las tres placas. Guatemala se localiza al noroeste de la Placa Caribe, constituye el límite con la Placa Norteamericana, el cual está definido por el sistema de Fallas de Polochic-Motagua. Este sistema corresponde a una zona activa de desplazamiento sinistral orientado Este-Oeste, caracterizado por grandes fallas principales: las fallas de Polochic, Motagua, y Jocotán/Chamelecón.” (Chiquín & Requena, 2001, pág. 6)

Chiquín & Requena (2001, pág. 6) citado textualmente menciona: “Dengo (1969), dividió a Guatemala en dos bloques tectónicos, denominados Bloque Maya y Bloque Chortí. El Bloque Maya constituye la parte continental del sur de la Placa Norteamericana y comprende la península Yucatán, Belice, Norte de Guatemala, y el sudeste de México. El Bloque Chortí constituye la parte oriental de la Placa Caribe, reagrupando el sur de Guatemala, Honduras, Salvador y una parte del Norte de Nicaragua. Estos dos bloques son separados por la Zona de Sutura de Motagua. Sin embargo algunos autores como Fourcade et al., (1994) han emitido la hipótesis de que la falla Polochic representa el límite entre los bloques Maya y Chortís.”

Figura 7. **Mapa Tectónico de Guatemala**



Fuente: (Chiquín & Requena, 2001, pág. 7)

Se debe mencionar que la interacción de las placas tectónicas en el territorio guatemalteco sumado a la actividad volcánica, son las principales causas de la formación y cambios en la geología local, así como, la formación de minerales como la arcilla, objeto de este estudio.

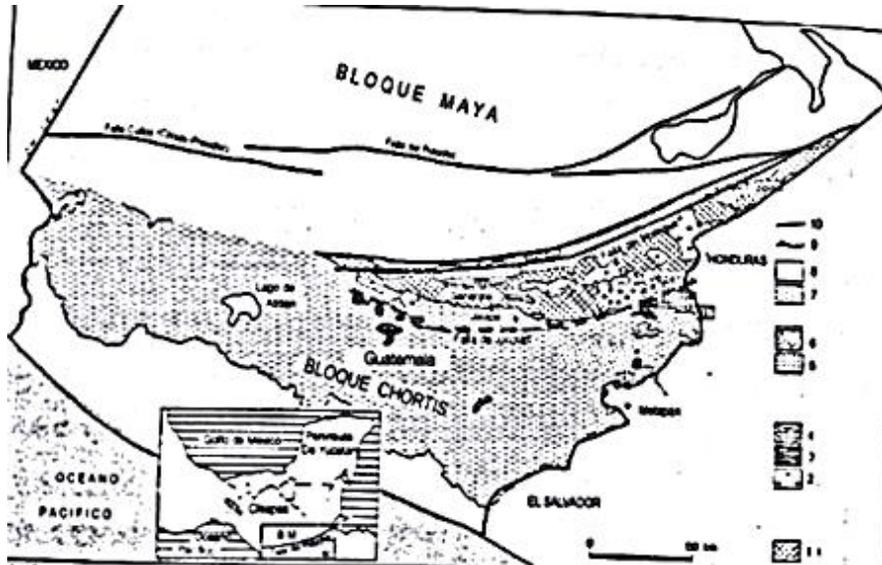
Las muestras de arcilla del presente estudio fueron tomadas en su totalidad en zonas situadas sobre el bloque Chortí, la ubicación y características de las mismas se amplían en el numeral 2.4.

2.2. Bloque Chortí

El bloque Chortí es parte de la Placa del Caribe, se define como una unidad litosférica independiente situada entre las grandes placas de Norteamérica y de Sudamérica. (Pérez, 2000).

En la configuración tectónica regional el bloque Chortí colinda con el bloque Maya al NW, el bloque Chorotega al SE y con la Placa de Cocos al Sur. “El bloque Chortí contiene las exposiciones de rocas metamórficas y rocas pre-Mesozoicas más extensas y ampliamente distribuidas de la Placa del Caribe” (Pérez, 2000, pág. 8). Por lo tanto, se puede afirmar que dicho bloque puede ser un mosaico de pequeños fragmentos de corteza de origen diverso.

Figura 8. **Bloque Chortí**



Fuente: (Pérez, 2000, pág. 10)

2.3. Descripción de las tres formaciones geológicas seleccionadas para su investigación

Tal como se mencionó en el numeral 1.4., las arcillas y lutitas pueden encontrarse en rocas de todas las edades, ya sea por formación o arrastre, su presencia en diversas formaciones es factible. Para el presente estudio se seleccionaron tres formaciones con características similares y de edades distintas, con el fin de evaluar las diferencias de las propiedades físico-mecánicas de las arcillas derivadas de dichas formaciones.

2.3.1. Unidad I, Rocas Ígneas y Metamórficas, Terciarias (Escala 1/500000).

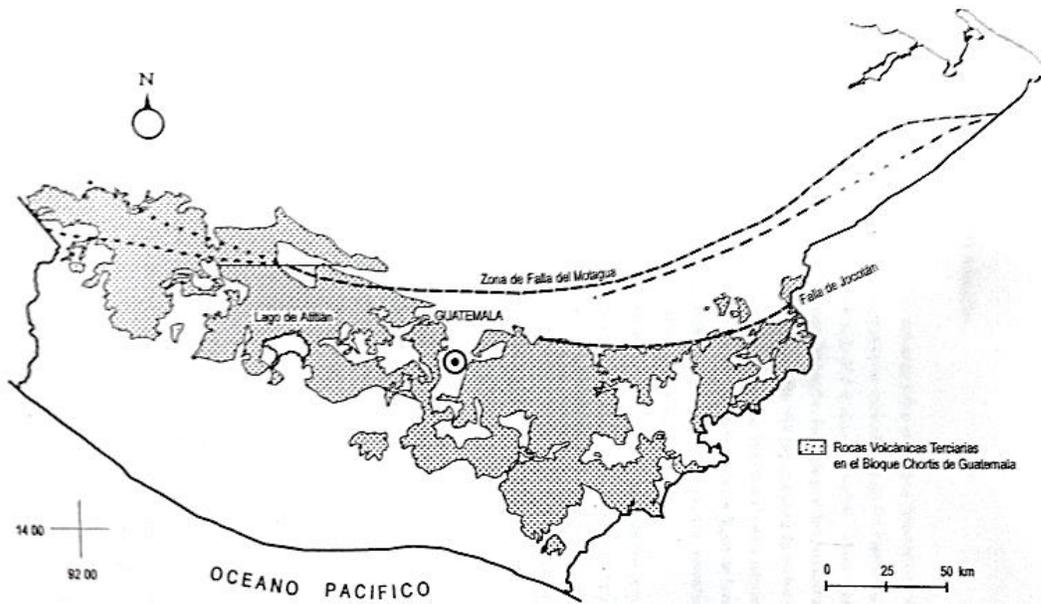
También se conoce como Unidades Terciarias y Terciario-Cuaternarias del Cuadrángulo Cuilapa; en dicho cuadrángulo se han descrito varias unidades principales, sin embargo, la mayor parte son informales.

Los volcánicos terciarios de Guatemala, cubren una amplia franja del altiplano entre la cadena montañosa central y la cordillera de volcanes cuaternarios que está súper impuesta en la orilla sur del altiplano. (Pérez, 2000)

“Williams detectó una división regional en 3 áreas: Al oeste predominan los flujos basálticos y andesita; en la parte central principalmente capas bastante gruesas de tobas candentes ocurren junto a tobas blancas de grano fino e ignimbritas con tufitas fluviátiles limnicas intercaladas; en este predominan lavas acidas y tobas candentes.” (Pérez, 2000, pág. 93)

Las capas de finos en la zona oeste que colinda con la central, así como las tobas candentes son depósitos ideales para la formación de arcillas; dentro de la Figura 9 muestra la extensión de las Rocas Volcánicas Terciarias y Terciario-Cuaternario a la cual pertenece la Unidad I sobre el bloque Chortí.

Figura 9. **Afloramiento de rocas volcánicas terciarias en el bloque Chortí**



Fuente: (Pérez, 2000, pág. 94)

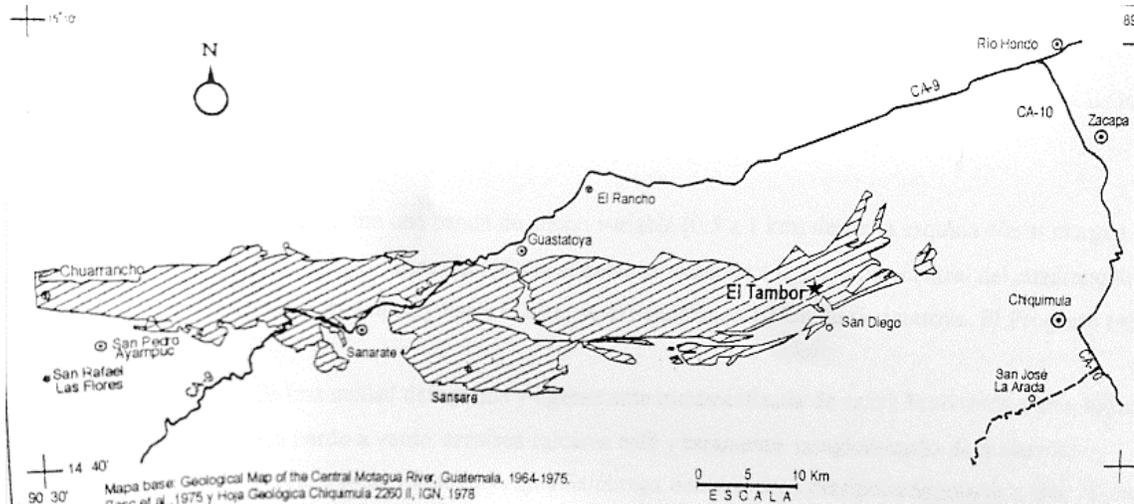
2.3.2. **Unidad Pzm, Grupo el Tambor, Paleozoico (Escala 1/500000).**

“La formación El Tambor fue nombrada inicialmente por McBirney y Bass (1969) para una secuencia de pizarra clorítica y argillita, metachert rítmicamente bandeadado, toba y lava básica metamorfizados, que aflora en una franja continua al sur de la Zona de Falla del Motagua” (Pérez, 2000, pág. 145)

El grupo el tambor se encuentra ubicado en el cuadrángulo de Sanarate, donde la mayoría de rocas han sido afectadas por un metamorfismo dinamo termal regional en grados bajos y medio-bajos, de donde se produjeron tres grados de metamorfismo propicios para la formación de arcillas.

En la Figura 10. se muestran los afloramientos del Grupo el Tambor, dentro de los cuales se encuentran las arcillas rojas en la zona de Sanarate.

Figura 10. **Afloramientos del Grupo el Tambor en el bloque Chortí**



Fuente: (Pérez, 2000, pág. 146)

2.3.3. **Unidad Qp, Rocas Ígneas y Metamórficas, Cuaternario (Escala 1/500000).**

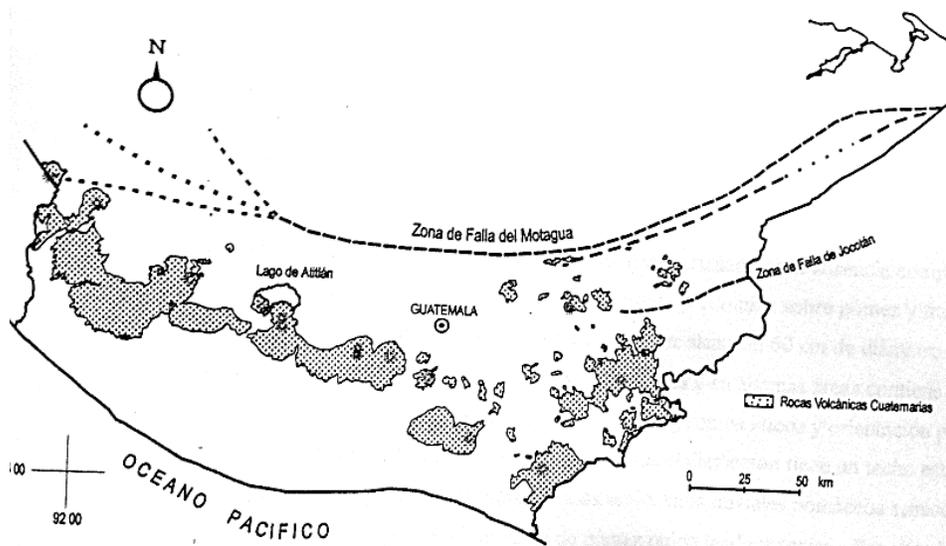
La actividad volcánica en el Cuaternario ha sido variada e intensa, los piroclastos y las lavas varían desde basaltos hasta riodacitas, con la mayoría de rocas intermedias presentes. (Pérez, 2000)

En el complejo del volcán de Pacaya en su historia eruptiva se han identificado tres fases distintas, cada una aislada en tiempo, que han dado origen a productos eruptivos química y petrográficamente distintos. (Pérez, 2000)

“La fase I está marcada por un período de vulcanismo andesítico primario y por el crecimiento del pequeño estratovolcán ancestral. La fase II incluye erupciones voluminosas de pómez dacítica y formación de domos. La fase III, que continúa actualmente, está caracterizado por la erupción de basaltos de olivino y al crecimiento y destrucción de los conos basálticos compuestos y los conos cineríticos.” (Pérez, 2000, pág. 96)

La formación de arcillas en el período cuaternario se encuentra ligada a la fase II del complejo del volcán de Pacaya que tal como se muestra en la Figura 11. alcanzó llegar hasta la zona de San Rafael Las Flores, de donde se tomó la muestra de arcilla.

Figura 11. **Afloramiento de rocas volcánicas cuaternarias en el bloque Chortí**



Fuente: (Pérez, 2000, pág. 98)

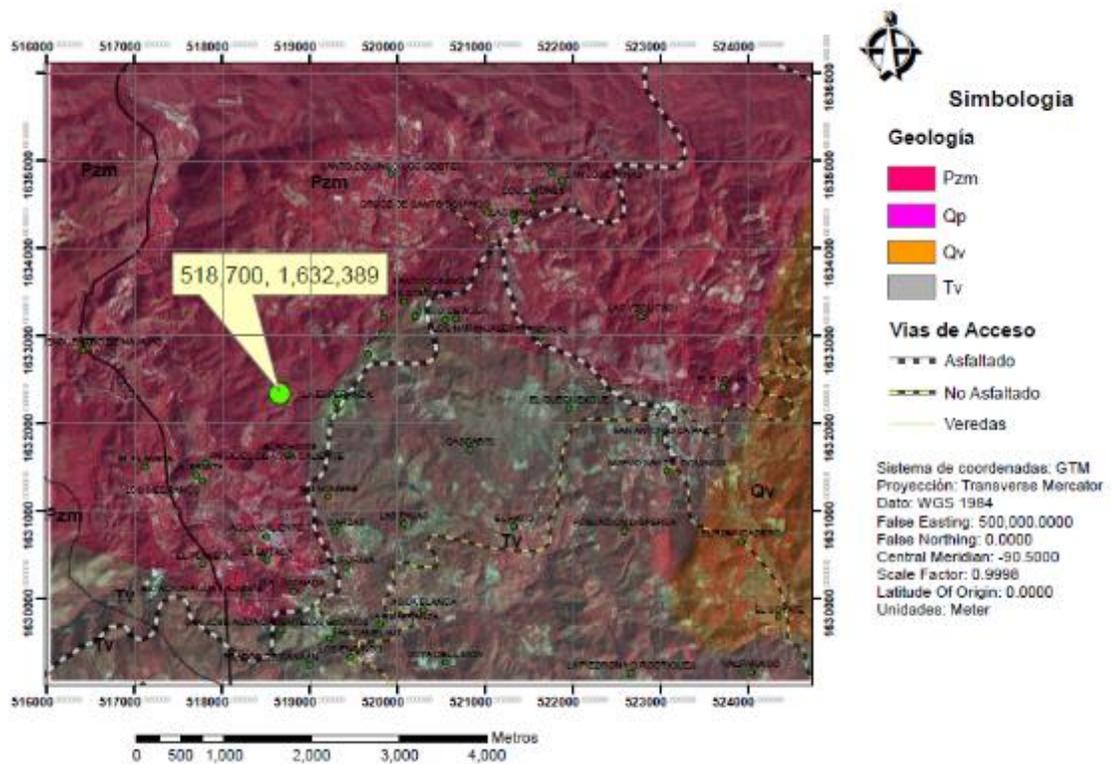
2.4. Ubicación y toma de muestras

Una vez identificadas las formaciones geológicas, se localizaron las áreas idóneas para la toma de muestras, situadas las mismas sobre derechos mineros otorgados por el Ministerio de Energía y Minas, lo que permitió obtenerlas de forma adecuada. Los mapas de ubicación, mapas geológicos y modelos se encuentran de forma amplia en el Anexo 1. La descripción de la muestra se incluye en los resultados de laboratorio de cada una.

2.4.1. Muestra M₁, Unidad Pzm

Las muestras M_{1a} y M_{1b}, fue tomada en las Coordenadas GTM (Guatemala Transversal Mercator) N 0518700 E 1632389, dentro del derecho minero denominado “El Hongo”, la misma forma parte de la formación geológica Pzm, tal como se muestra en la Figura 12.

Figura 12. Ubicación geológica de la muestra M₁



Fuente: elaboración propia.

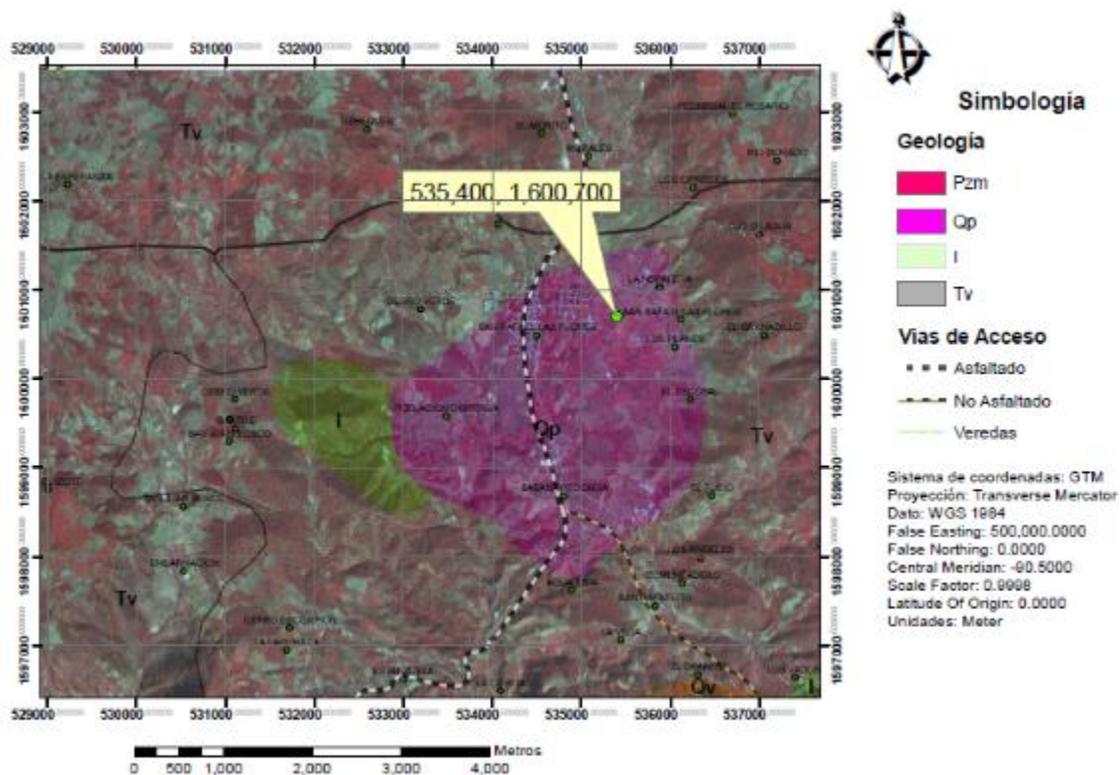
2.4.2. Muestra M₂, Unidad Qp

La muestra M₂, pertenece a un grupo de muestras dispersas recolectadas en las Coordenadas GTM N 0535400 E 1600700, dentro del derecho minero

denominado “Escobal”, estas dentro del perímetro de la unidad I que colinda en forma cercana a una formación Qp, tal como se muestra en la Figura 13.

De este punto se recolectaron dos tipos distintos de arcilla que pertenecen a la misma formación, por lo que la muestra se descompone en M_{2a} y M_{2b}, de esta forma se identificarán a partir de este punto.

Figura 13. Ubicación geológica de las muestras M₂



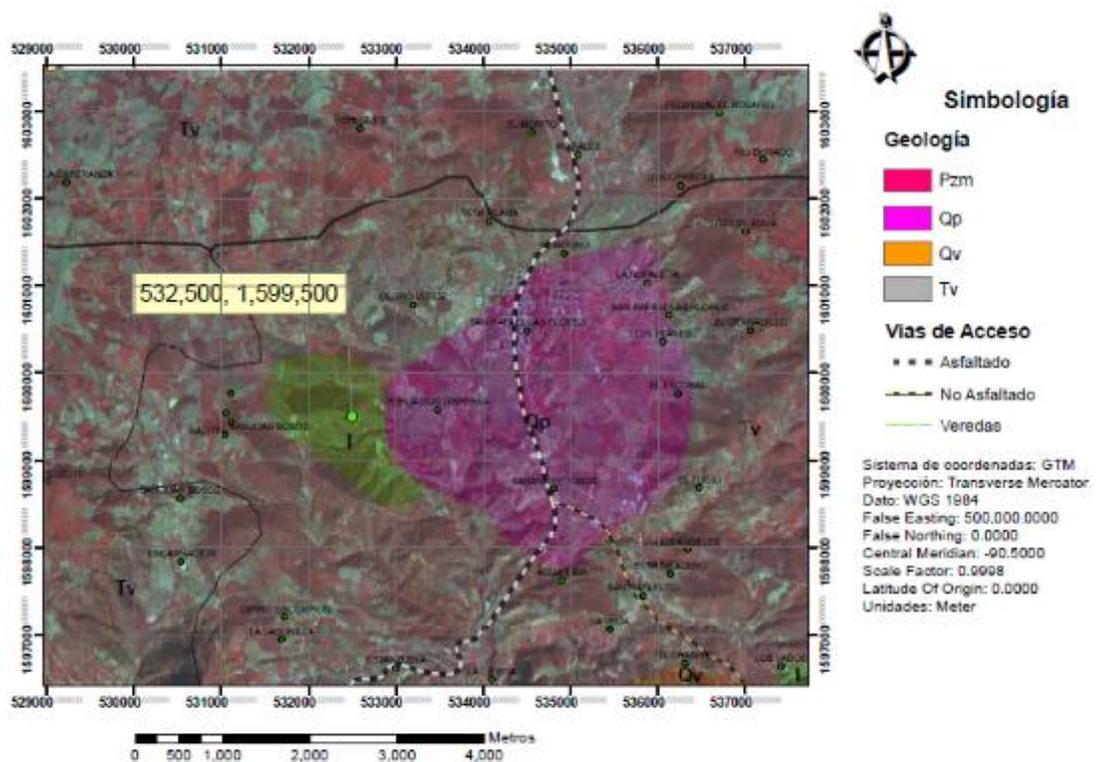
Fuente: elaboración propia.

2.4.3. Muestra M₃, Unidad I

La muestra M₃ al igual que la muestra M₂, fue tomada dentro del derecho minero “Escobal”, pero a diferencia de la anterior, el punto se localiza dentro de la formación Qp.

Se tomaron dos muestras de arcillas con propiedades distintas en el mismo punto, que derivado de la riqueza geológica del sector, presentan características distintas, las mismas se identificaron como M_{3a} y M_{3b}. El punto de muestreo se ubica en Coordenadas GTM N 0532500 E 1599500, tal como se visualiza en la Figura 14.

Figura 14. Ubicación geológica de las muestras M3



Fuente: elaboración propia.

2.4.4. Procedimiento de toma y tratamiento de muestras

Las muestras evaluadas en la presente investigación, se tomaron de forma alterada, con excepción de la muestra M_1 extraída de forma inalterada, siguiendo los procedimientos establecidos en la norma ASTM C-702.

El procedimiento de toma de muestras inalteradas consistió en extraer con una pala de los frentes mineralizados hacia un recipiente debidamente identificado un aproximado de 45 kilogramos de arcilla, para luego tomar la coordenada GTM del punto y proceder a sellar y trasladar la muestra al laboratorio. El detalle de los procedimientos por muestra es el siguiente:

- Muestra M_{1a} : con apoyo de los encargados de laboratorio de la empresa minera encargada del sitio, se extrajo una muestra inalterada del bloque arcilloso, color rojo, misma que fue cubierta con parafina para conservar sus propiedades in situ. Adicionalmente se extrajo de forma alterada un aproximado de 2 kilogramos para enviar al laboratorio químico. La contra muestra M_{1b} , se tomó de forma alterada, sin embargo, fue contaminada al momento de trasladarla al laboratorio de suelos, únicamente se recuperó la porción que se trasladó al laboratorio químico.
- Muestras M_{2a} y M_{2b} : ambas muestras tomadas de forma alterada, tomando el mineral del bloque arcilloso, con una pala y guardándolas en un recipiente debidamente identificado. Ambas muestras de aproximadamente 45 kilogramos cada una y 2 kilogramos para enviar al laboratorio químico. El estrato muestreado es color beige claro, visiblemente meteorizado.

- Muestras M_{3a} y M_{3b}: al igual que las muestras anteriores, se extrajeron de forma alterada siguiendo los mismos pasos antes descritos. Las muestras M₃ de color café, al momento de tomarlas presentaban condiciones de humedad alta, y evidente grado de plasticidad. La particularidad de estas, es que se extrajeron en una zona del túnel Escobal, con grados de meteorización menores que las anteriores.
- El tratamiento de cada una de las muestras en laboratorio, se trabajó conforme lo establecido en normas nacionales e internacionales; granulometría por sedimentación, ASTM D421; límites de Atterberg, ASHTO T-89 y T-90, ASTM D-854; corte directo ASTM 3080; consolidación ASTM D-2435.
- Luego de llegar al laboratorio las muestras fueron pesadas, identificadas, separadas y preparadas conforme a lo requerido en cada ensayo, para luego ser sometidas a los procesos establecidos en las normas antes citadas.

2.4.5. Proceso de meteorización

La meteorización que da lugar a la formación de arcillas (Suárez, 2009) lo describe de la siguiente forma:

“En ambientes tropicales, dominados por temperaturas altas y cambiantes y por lluvias abundantes, la meteorización de los materiales es muy fuerte, caracterizándose por la descomposición rápida de feldespatos y minerales ferromagnesianos, la concentración de óxidos de hierro y aluminio y la remoción de Sílice y de las bases Na₂O - K₂O- CaO y MgO (Gidigasú-1972). Los feldespatos se meteorizan inicialmente a Kaolinita, Oxidos de Hierro y Oxidos de

Aluminio y los compuestos más resistentes como las partículas de Mica y Cuarzo permanecen.

La meteorización de rocas y cenizas volcánicas conducen a la formación de Montmorillonitas, Aloisitas, óxidos de hierro y aluminio en las etapas iniciales de la meteorización y finalmente se pueden formar Caolinitas, Esmectitas y Gibsitas (González y Jiménez - 1981)”

Los minerales resultantes de los procesos antes descritos, mismos que son objeto de esta investigación, son explicados por (Suárez, 2009) de la siguiente manera:

“**Caolinita:** Los suelos con caolinita como mineral de arcilla presentan un comportamiento normal en los ensayos, en términos de baja a media plasticidad y permeabilidad. El efecto del aumento de humedad sobre las propiedades del suelo generalmente, no es importante.

Montmorillonita: Los materiales con contenidos apreciables de Montmorillonita poseen muy alta plasticidad y baja permeabilidad. El efecto del aumento de humedad puede resultar en una disminución importante de la resistencia al cortante. La Montmorillonita tiene un alto nivel de reacción con el cemento y la cal.

Aloisita: Al aumentar la humedad de una aloisita puede disminuir la resistencia al cortante en forma apreciable.”

3. MARCO PRÁCTICO

Dentro de los objetivos de la investigación los ensayos de laboratorio para determinar tanto las propiedades físico-mecánicas como químico-mineralógicas, ocupan una posición prioritaria. Los mismos indicarán los valores cuantitativos de las distintas propiedades que posteriormente serán correlacionadas y evaluadas con el fin de comprobar la hipótesis y cumplir los objetivos planteados.

3.1. Ensayos de laboratorio

La primera fase de ensayos, consiste en identificar a que grupo estructural pertenece la muestra de arcilla, para ello se realizaron análisis químico-mineralógicos donde se identifica el porcentaje de presencia de los diversos minerales en la muestra.

La segunda fase, comienza una vez identificada la estructura químico-mineralógica de la muestra, y con ello evaluar las propiedades físico-mecánicas a través de ensayos de suelos.

Los valores obtenidos y resultados de laboratorio se presentan ampliamente en el Anexo.

3.1.1. Análisis químico-mineralógico, muestra M₁

Las muestras M_{1a} y M_{1b}, presentan los siguientes minerales y sus respectivos porcentajes dentro de la porción analizada, tal como se observa en las Tablas V y VI:

Tabla V. **Resultados químico-mineralógicos de la muestra M_{1a}**

Descripción	Técnica	Resultados en forma elemental	Predominancia de mineral en %
Silicio, % masa	ICP-OES	22.10	51.68%
Aluminio, % masa	ICP-OES	12.03	28.13%
Bario, % masa	ICP-OES	0.37	0.87%
Calcio, % masa	ICP-OES	0.29	0.68%
Hierro, % masa	ICP-OES	6.72	15.72%
Magnesio, % masa	ICP-OES	1.21	2.83%
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.02	0.05%
Estroncio, mg/Kg	ICP-OES	0.02	0.05%

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Resultados químico-mineralógicos de la muestra M_{1b}**

Descripción	Técnica	Resultados en forma elemental	Predominancia de mineral en %
Silicio, % masa	ICP-OES	27.19	62.87%
Aluminio, % masa	ICP-OES	6.61	15.28%
Bario, % masa	ICP-OES	0.09	0.21%
Calcio, % masa	ICP-OES	4.98	11.51%
Hierro, % masa	ICP-OES	3.47	8.02%
Magnesio, % masa	ICP-OES	0.84	1.94%
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.06	0.14%
Estroncio, mg/Kg	ICP-OES	0.01	0.02%

Fuente: elaboración propia.

Se debe aclarar que la muestra M_{1b}, únicamente fue analizada en sus propiedades químico – mineralógicas, debido a que la muestra fue alterada, lo que la hace descartable para la investigación.

3.1.2. Análisis químico-mineralógico, muestra M_{2a}

La muestra M_{2a}, presenta los siguientes minerales y sus respectivos porcentajes dentro de la muestra, tal como se observa en la Tabla VII:

Tabla VII. Resultados químico-mineralógicos de la muestra M_{2a}

Descripción	Técnica	Resultados en forma elemental	Predominancia de mineral en %
Silicio, % masa	ICP-OES	33.6	76.03%
Aluminio, % masa	ICP-OES	9.12	20.64%
Bario, % masa	ICP-OES	0.05	0.11%
Calcio, % masa	ICP-OES	0	0.00%
Hierro, % masa	ICP-OES	1.12	2.53%
Magnesio, % masa	ICP-OES	0.29	0.66%
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.01	0.02%
Estroncio, mg/Kg	ICP-OES	0.004	0.01%

Fuente: elaboración propia.

3.1.3. Análisis químico-mineralógico, muestra M_{2b}

La muestra M_{2b}, presenta los siguientes minerales y sus respectivos porcentajes dentro de la muestra, tal como se observa en la Tabla VIII:

Tabla VIII. **Resultados químico-mineralógicos de la muestra M2b**

Descripción	Técnica	Resultados en forma elemental	Predominancia de mineral en %
Silicio, % masa	ICP-OES	30.93	71.64%
Aluminio, % masa	ICP-OES	9.56	22.14%
Bario, % masa	ICP-OES	0.06	0.14%
Calcio, % masa	ICP-OES	0.16	0.37%
Hierro, % masa	ICP-OES	1.87	4.33%
Magnesio, % masa	ICP-OES	0.59	1.37%
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.003	0.01%
Estroncio, mg/Kg	ICP-OES	0.004	0.01%

Fuente: elaboración propia.

3.1.4. Análisis químico-mineralógico, muestra M_{3a}

La muestra M_{3a}, presenta los siguientes minerales y sus respectivos porcentajes dentro de la muestra, tal como se observa en la Tabla IX:

Tabla IX. **Resultados químico-mineralógicos de la muestra M_{3a}**

Descripción	Técnica	Resultados en forma elemental	Predominancia de mineral en %
Silicio, % masa	ICP-OES	30.65	71.27%
Aluminio, % masa	ICP-OES	9.05	21.04%
Bario, % masa	ICP-OES	0.07	0.16%
Calcio, % masa	ICP-OES	0	0.00%
Hierro, % masa	ICP-OES	2.34	5.44%
Magnesio, % masa	ICP-OES	0.87	2.02%
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.02	0.05%
Estroncio, mg/Kg	ICP-OES	0.005	0.01%

Fuente: elaboración propia.

3.1.5. Análisis químico-mineralógico, muestra M_{3b}

La muestra M_{3b}, presenta los siguientes minerales y sus respectivos porcentajes dentro de la muestra, tal como se observa en la Tabla X:

Tabla X. Resultados químico-mineralógicos de la muestra M_{3b}

Descripción	Técnica	Resultados en forma elemental	Predominancia de mineral en %
Silicio, % masa	ICP-OES	30.72	71.09%
Aluminio, % masa	ICP-OES	8.95	20.71%
Bario, % masa	ICP-OES	0.08	0.19%
Calcio, % masa	ICP-OES	0	0.00%
Hierro, % masa	ICP-OES	2.51	5.81%
Magnesio, % masa	ICP-OES	0.94	2.18%
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.01	0.02%
Estroncio, mg/Kg	ICP-OES	0.003	0.01%

Fuente: elaboración propia.

3.1.6. Análisis físico-mecánico de la muestras de arcilla

Para determinar los parámetros cuantitativos de las propiedades físico-mecánicas de las muestras obtenidas, se realizaron algunos de los ensayos descritos en la sección 1.7.2. de donde se muestran los siguientes resultados:

3.1.6.1. Granulometría, M₁

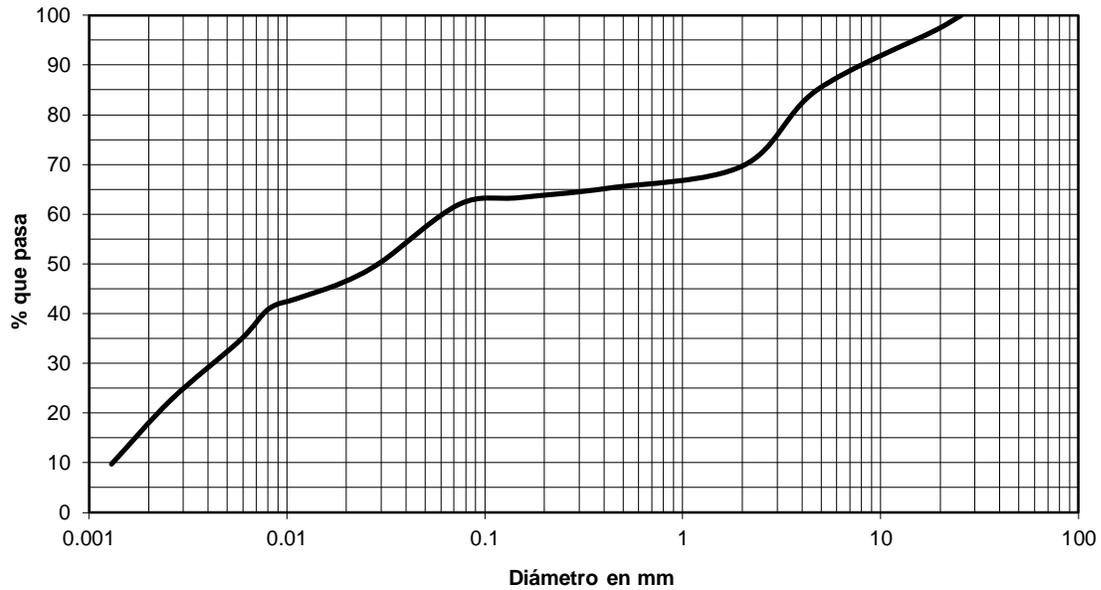
Los resultados del ensayo granulométrico efectuado a la muestra M₁ se presentan en la Tabla XI. y Figura 15:

Tabla XI. **Granulometría de la muestra M₁**

	Diámetro	% que pasa
Tamiz	25.4	100
	19	97.08
	4.75	85
	2.00	69.73
	0.425	65.29
	0.150	63.37
	0.074	62.00
Hidrómetro	0.030	50.45
	0.019	46.24
	0.0113	43.09
	0.0081	40.99
	0.0058	34.68
	0.0026	22.70
	0.0013	9.77

Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

Figura 15. **Curva granulométrica de la muestra M₁**



Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

3.1.6.2. Límites de Atterberg, M₁

El resultado respecto a la plasticidad y límite líquido de la muestra M₁ se presenta en la Tabla XII:

Tabla XII. Límites de Atterberg muestra M₁

MUESTRA	LL	IP	CLASIFICACIÓN*	DESCRIPCIÓN DEL SUELO*
No.				
1	40.70	19.00	CL	Arcilla de baja compresibilidad

Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

3.1.6.3. Corte directo, M₁

El ensayo de corte directo sirve para simular las condiciones del suelo y obtener los valores de soporte, cohesión y ángulo de fricción interna del mismo. Los resultados del ensayo de corte directo se muestran en la Tabla XIII y la Figura 16:

Tabla XIII. Resultados del ensayo de corte directo para la muestra M₁

PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 10.8$	COHESIÓN: $C_u = 0.9 \text{ T/m}^2$
--	-------------------------------------

DESCRIPCIÓN DEL SUELO: Arcilla limo arenosa color café rojizo

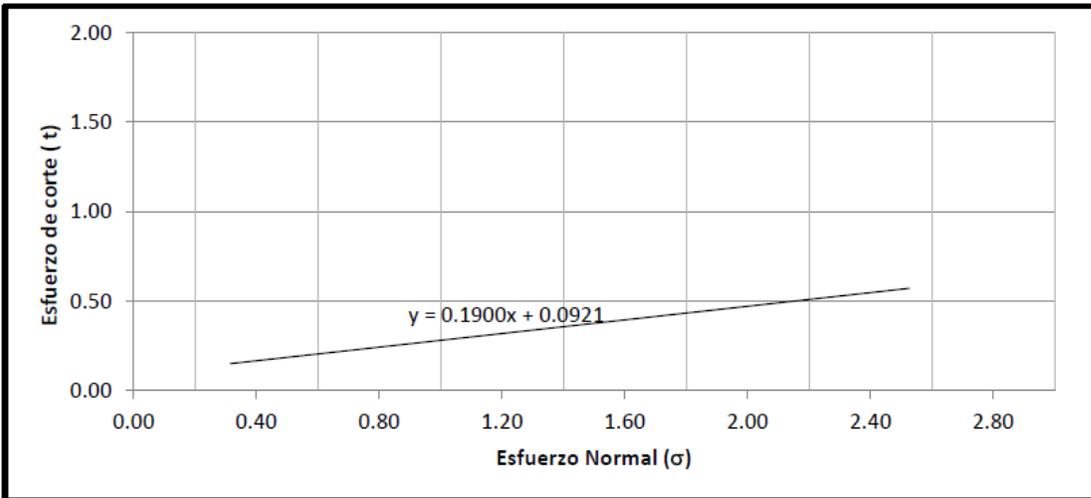
DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 1.0"

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

PROBETA No.	1	2	3	4
ESFUERZO NORMAL (kg/cm ²)	0.32	0.63	1.26	2.53
ESFUERZO DE CORTE (kg/cm ²)	0.04	0.27	0.44	0.52
DENSIDAD HUMEDA (T/m ³)	1.67	1.67	1.67	1.67
HUMEDAD (%H)	35.1	35.1	35.1	35.1

Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

Figura 16. **Envolvente de falla, corte directo**



Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

3.1.6.4. Consolidación y gravedad específica, M_1

Los datos de interés en la investigación sobre la muestra M_1 sobre consolidación y gravedad específica se presentan en las Tablas XIV y XV:

Tabla XIV. **Resultados de consolidación, M_1**

RESULTADOS			
Diámetro interior del molde (cm) :	6.35	Gravedad específica de los sólidos :	2.5
Area de la muestra (cm^2) :	31.67	Altura de sólidos (cm) :	1.22
Altura inicial de la muestra (cm) :	2.54	Relación de vacíos inicial :	1.08
Volumen inicial de la muestra (cm^3) :	80.39	Humedad inicial (%) :	52.3
Densidad Humeda (g/cm^3) :	1.8	Densidad Seca (g/cm^3) :	1.18
Esfuerzo de preconsolidacion (kg/cm^2) :	0.36	Esfuerzo de sobrecarga (kg/cm^2) :	0.92
Coef. De compresion	0.26	Coef. Expansion:	0.01

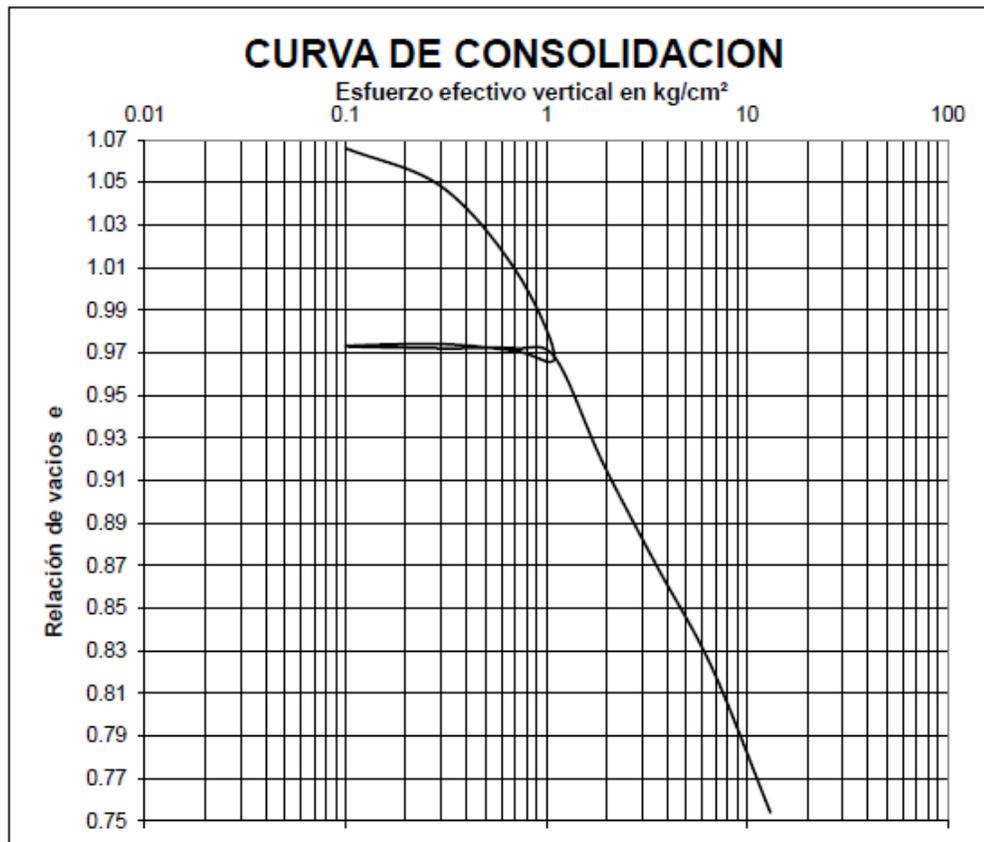
Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

Tabla XV. Datos para elaborar curva de compresibilidad, M_1

PARAMETROS DE CONSOLIDACION							
Presion Kg/cm ²	Lectura (10 ⁻²)	Deformacion	Espesor	Relacion de vacios	Tiempos (min)		Coef. Consolidacion
					T50	T90	
0	0	0	25.40	1.082	0	0	0
0.1	19.05	0.19	25.21	1.066	5	8	5.71E-07
0.30	45.11	0.45	24.95	1.045	5	8	2.85E-07
0.70	88.11	0.88	24.52	1.010	10	15	1.52E-07
1.10	139.0	1.39	24.01	0.968	10	15	1.52E-07
1.90	204.3	2.04	23.36	0.914	20	30	7.61E-08
3.50	257.06	2.57	22.83	0.871	20	30	7.61E-08
6.70	317.67	3.18	22.22	0.822	40	60	3.81E-08
18.10	399.83	4.00	21.40	0.754	80	120	1.90E-08

Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

Figura 17. Curva de consolidación muestra M_1



Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

3.1.6.5. Granulometría, M_{2a}

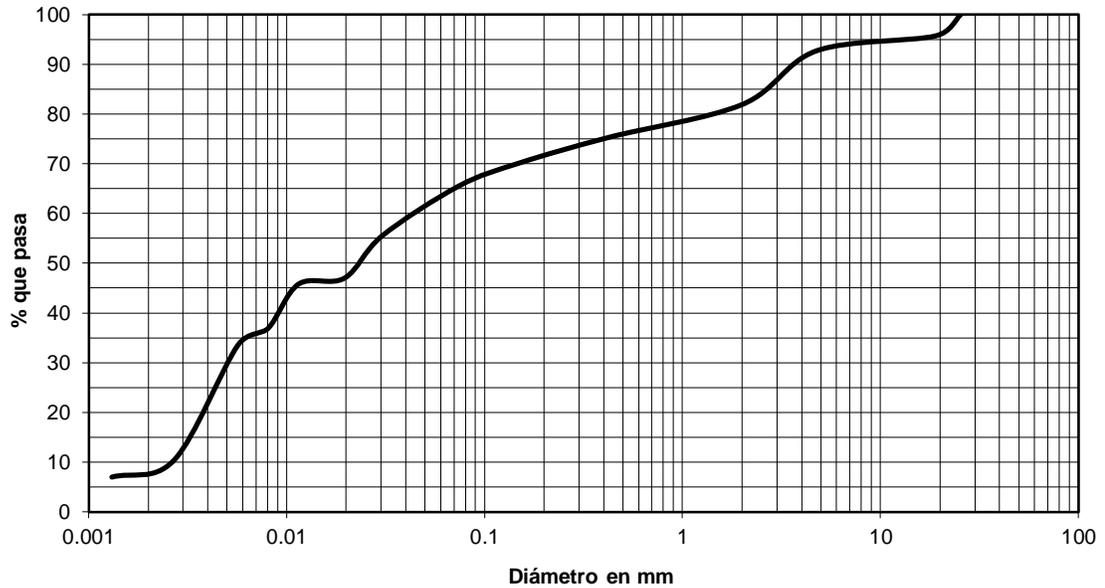
Los resultados del ensayo granulométrico efectuado a la muestra se presentan en la Tabla XVI. y Figura 18:

Tabla XVI. **Granulometría de la muestra M_{2a}**

	Diámetro	% que pasa
Tamiz	25.4	100
	19	95.70
	4.75	92.7
	2.00	81.90
	0.425	75.30
	0.150	70.15
	0.074	65.50
Hidrómetro	0.03037	55.5
	0.0196	47.00
	0.01149	45.8
	0.00806	36.90
	0.00567	33.5
	0.00270	10.40
	0.00131	7.00

Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

Figura 18. Curva granulométrica de la muestra M_{2a}



Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

3.1.6.6. Límites de Atterberg, M_{2a}

La plasticidad de la muestra M_{2a}, así como su límite líquido se presentan en la Tabla XVII:

Tabla XVII. Datos para determinar límite líquido de la muestra M_{2a}

<i>MUESTRA</i>	<i>LL</i>	<i>IP</i>	<i>CLASIFICACIÓN</i> *	<i>DESCRIPCIÓN DEL SUELO*</i>
<i>No.</i>				
2	48.30	29.27	CL	Arcilla de baja compresibilidad

Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

3.1.6.7. Corte directo, M_{2a}

El ensayo de corte directo sirve para simular las condiciones del suelo y obtener los valores de soporte, cohesión y ángulo de fricción interna del mismo. Los resultados del ensayo de corte directo se muestran en la Tabla XVIII y la Figura 19:

Tabla XVIII. Resultados del ensayo de corte directo para la muestra M_{2a}

PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 11.9^\circ$	COHESIÓN: $C_u = 1.3 \text{ T/m}^2$
--	-------------------------------------

DESCRIPCIÓN DEL SUELO: Arcilla limosa color beige claro

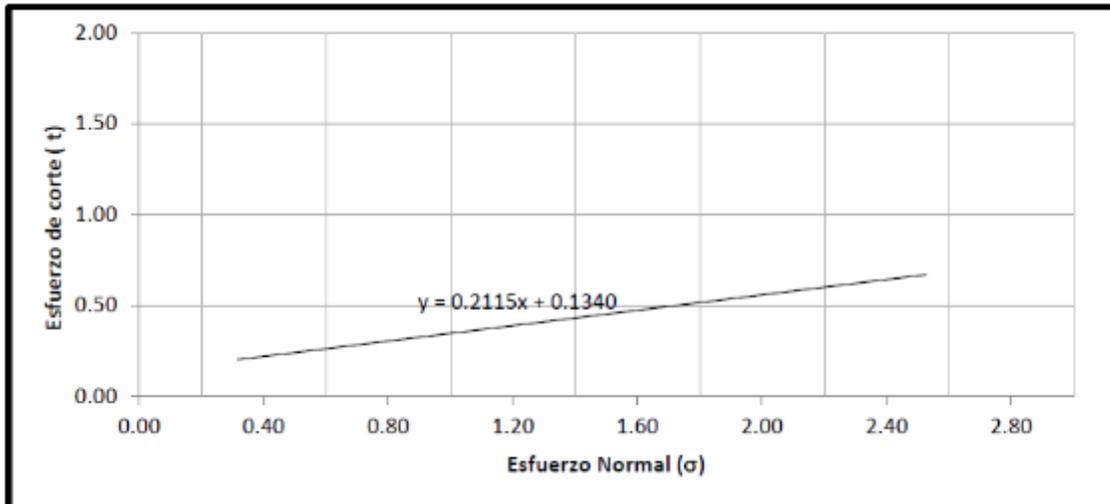
DIMENSIÓN Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 1.0"

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

PROBETA No.	1	2	3	4
ESFUERZO NORMAL (kg/cm ²)	0.32	0.63	1.26	2.53
ESFUERZO DE CORTE (kg/cm ²)	0.05	0.38	0.49	0.61
DENSIDAD HUMEDA (T/m ³)	1.75	1.75	1.75	1.75
HUMEDAD (%H)	37.1	37.1	37.1	37.1

Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

Figura 19. Envoltente de falla, corte directo



Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

3.1.6.8. Consolidación y gravedad específica, M_{2a}

Los datos de interés en la investigación sobre la muestra M_{2a} sobre consolidación y gravedad específica se presentan en las Tablas XIX y XX:

Tabla XIX **Resultados de consolidación, M_{2a}**

Características de la muestra			
Diámetro interior del molde (cm) :	6.35	Gravedad específica de los sólidos :	2.54
Area de la muestra (cm ²) :	31.67	Altura de sólidos (cm) :	0.98
Altura inicial de la muestra (cm) :	2.54	Relación de vacíos inicial :	1.59
Volumen inicial de la muestra (cm ³) :	80.39	Humedad inicial (%) :	65.3
Densidad Humeda (g/cm ³):	1.63	Densidad Seca (g/cm ³):	0.99
Esfuerzo de preconsolidacion (kg/cm ²):	0.9	Esfuerzo de sobrecarga (kg/cm ²):	0.8
Coef. De compresion	0.31	Coef. Expansion:	0.04

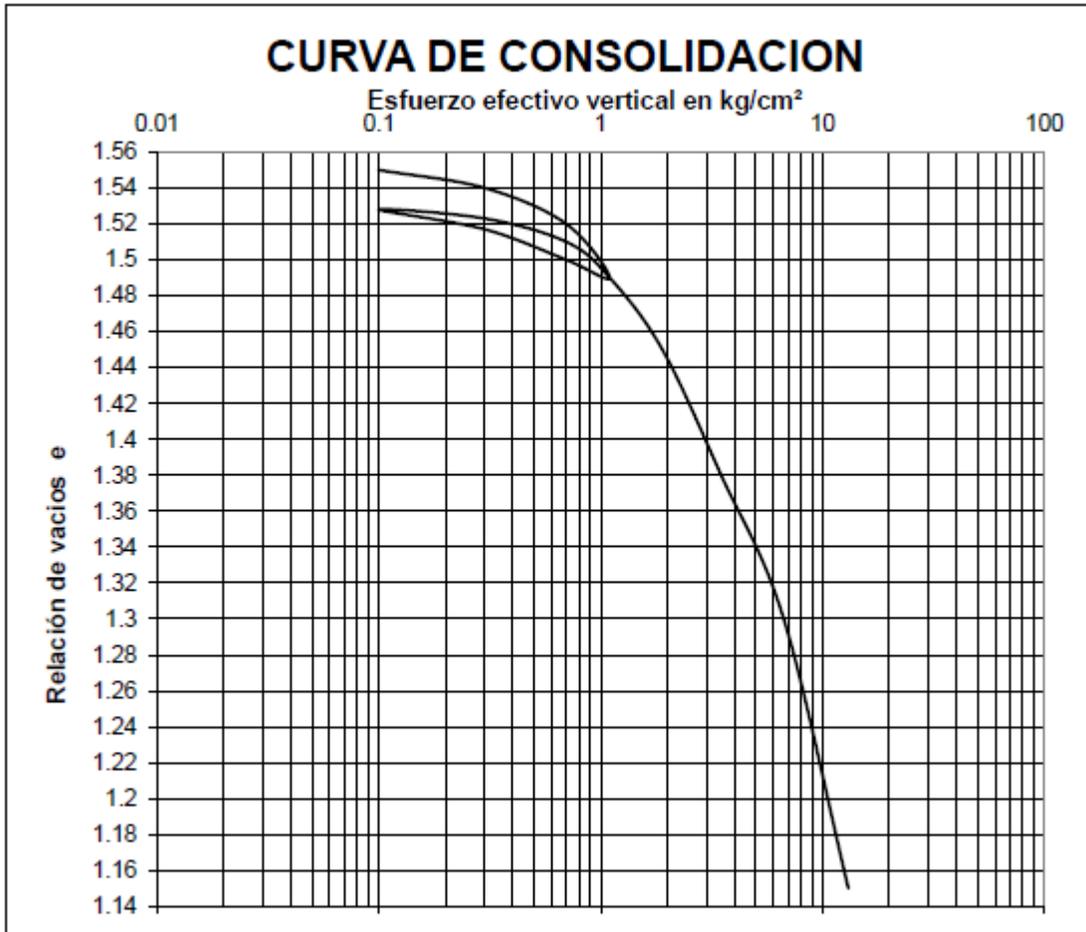
Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

Tabla XX. **Datos para elaborar curva de compresibilidad, M_{2a}**

PARAMETROS DE CONSOLIDACION							
Presion kg/cm ²	Lectura (10 ⁻³)	Deformacion	Espesor	Relacion de vacios	Tiempos (min)		Coef. Consolidacion
					T50	T90	
0	0	0	25.40	1.592	0	0	0
0.1	38.1	0.38	25.02	1.553	1.5	2.5	9.13E-07
0.30	50.8	0.51	24.89	1.540	2.7	5	4.57E-07
0.70	68.58	0.69	24.71	1.522	2.5	4	5.71E-07
1.10	101.6	1.02	24.38	1.488	8.5	15	1.52E-07
1.90	217.0	2.17	23.23	1.370	2.5	4	5.71E-07
3.50	233.57	2.34	23.06	1.354	12.3	20	1.14E-07
6.70	278.66	2.79	22.61	1.307	8.1	14	1.63E-07
18.10	427.77	4.28	21.12	1.155	5.5	8	2.85E-07

Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

Figura 20. Curva de consolidación muestra M_{2a}



Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

3.1.6.9. Granulometría, M₂b

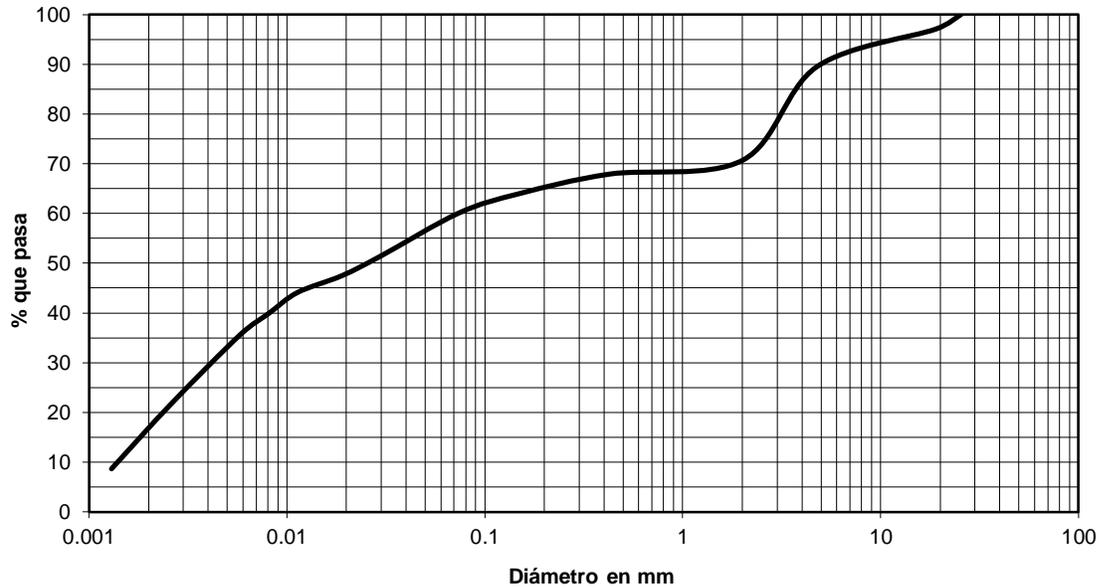
Los resultados del ensayo granulométrico efectuado a la muestra se presentan en la Tabla XXI. y Figura 21:

Tabla XXI. **Granulometría de la muestra M₂b**

	Diámetro	% que pasa
Tamiz	25.4	100
	19	97.08
	4.75	89.5
	2.00	70.68
	0.425	67.90
	0.150	64.00
	0.074	60.10
Hidrómetro	0.030	51.5
	0.019	47.5
	0.0113	44.1
	0.0081	39.9
	0.0058	35.6
	0.0026	21.70
	0.0013	8.66

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Curva granulométrica de la muestra M₂b**



Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

3.1.6.10. Límites de Atterberg, M₂b

Para la muestra M₂b se presentan en la Tabla XXII los resultados obtenidos:

Tabla XXII. **Datos para determinar límite líquido de la muestra M₂b**

MUESTRA	LL	IP	CLASIFICACION	DESCRIPCION DEL SUELO*
No.				
3	43.10	23.60	CL	Arcilla de baja compresibilidad

Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

3.1.6.11. Corte directo, M₂b

El ensayo de corte directo sirve para simular las condiciones del suelo y obtener los valores de soporte, cohesión y ángulo de fricción interna del mismo. Los resultados del ensayo de corte directo se muestran en la Tabla XXIII y la Figura 22:

Tabla XXIII. **Resultados del ensayo de corte directo para la muestra M₂b**

PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 13.0^\circ$	COHESIÓN: $C_u = 1.3 \text{ T/m}^2$
--	-------------------------------------

DESCRIPCION DEL SUELO: Arcilla limo arenosa color beige claro

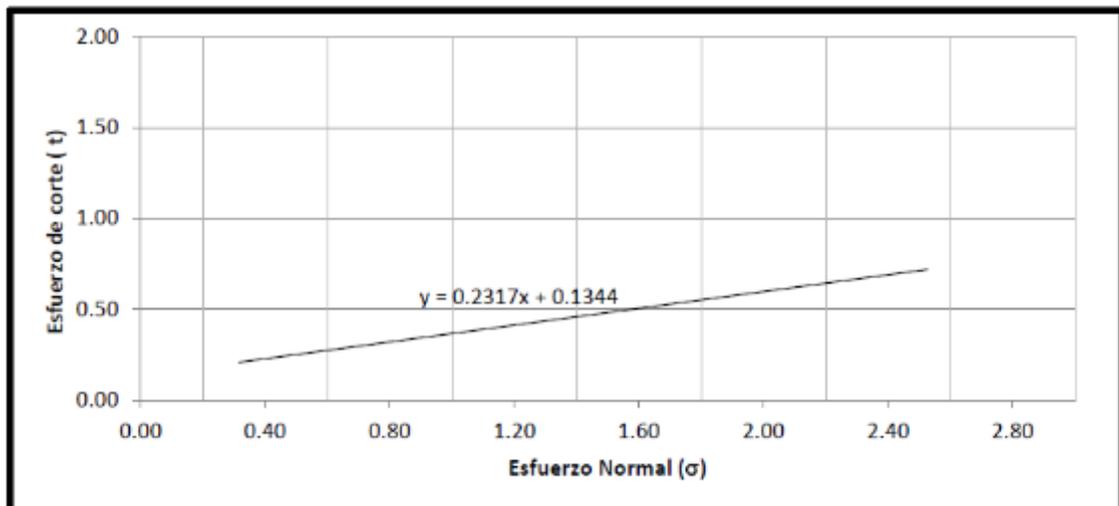
DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 1.0"

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

PROBETA No.	1	2	3	4
ESFUERZO NORMAL (kg/cm^2)	0.32	0.63	1.26	2.53
ESFUERZO DE CORTE (kg/cm^2)	0.14	0.32	0.49	0.69
DENSIDAD HUMEDA (T/m^3)	1.78	1.78	1.78	1.78
HUMEDAD (%H)	35.1	35.1	35.1	35.1

Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

Figura 22. **Envolvente de falla, corte directo**



Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

3.1.6.12. Consolidación y gravedad específica, M_{2b}

Los datos de interés en la investigación sobre la muestra M_{2b} sobre consolidación y gravedad específica se presentan en las Tablas XXIV y XXV:

Tabla XXIV. **Resultados de consolidación, M_{2b}**

RESULTADOS			
Diámetro interior del molde (cm) :	6.35	Gravedad específica de los sólidos :	2.64
Area de la muestra (cm ²) :	31.67	Altura de sólidos (cm) :	1.08
Altura inicial de la muestra (cm) :	2.54	Relación de vacíos inicial :	1.35
Volumen inicial de la muestra (cm ³) :	80.39	Humedad inicial (%) :	56.7
Densidad Humeda (g/cm ³):	1.78	Densidad Seca (g/cm ³):	1.13
Esfuerzo de preconsolidacion (kg/cm ²):	0.9	Esfuerzo de sobrecarga (kg/cm ²):	1.6
Coef. De compresion	0.31	Coef. Expansion:	0.015

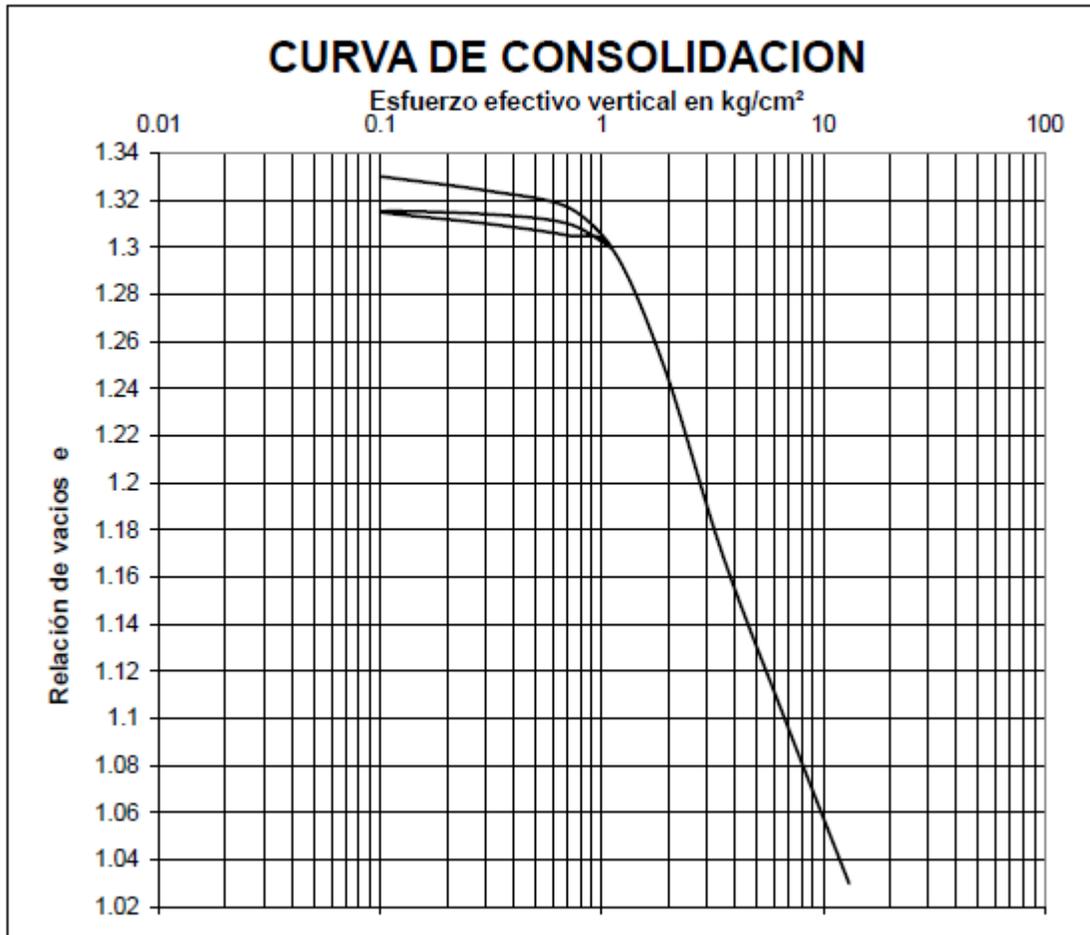
Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

Tabla XXV. **Datos para elaborar curva de compresibilidad, M_{2b}**

PARAMETROS DE CONSOLIDACION							
Presion Kg/cm ²	Lectura (10 ⁻²)	Deformacion	Espesor	Relacion de vacios	Tiempos T50	(min) T90	Coef. Consolidacion
0	0	0	25.40	1.352	0	0	0
0.1	21.94	0.22	25.18	1.332	1.3	2	1.14E-06
0.30	30.02	0.30	25.10	1.324	2.7	4	5.71E-07
0.70	45.72	0.46	24.94	1.310	2.7	4	5.71E-07
1.10	58.83	0.59	24.81	1.297	1.3	2	1.14E-06
1.90	111.0	1.11	24.29	1.249	2.0	3	7.61E-07
3.50	191.44	1.91	23.49	1.175	2.0	3	7.61E-07
6.70	274.77	2.75	22.65	1.097	2.7	4	5.71E-07
18.10	352.22	3.52	21.88	1.026	5.3	8	2.85E-07

Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

Figura 23. Curva de consolidación muestra M₂b



Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

3.1.6.13. Granulometría, M_{3a}

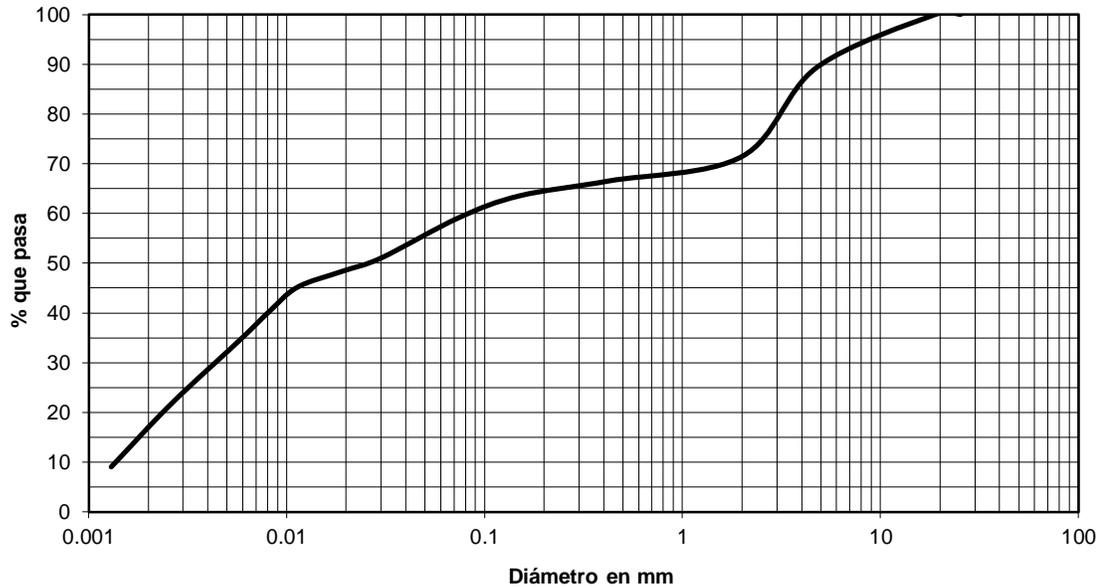
Los resultados del ensayo granulométrico efectuado a la muestra se presentan en la Tabla XXVI. y Figura 24:

Tabla XXVI. **Granulometría de la muestra M_{3a}**

	Diámetro	% que pasa
Tamiz	25.4	100
	19	100
	4.75	89.3
	2.00	71.44
	0.425	66.50
	0.150	63.50
	0.074	59.10
Hidrómetro	0.030	51
	0.019	48.3
	0.0113	45.1
	0.0081	40.1
	0.0058	34.5
	0.0026	21.60
	0.0013	9

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Curva granulométrica de la muestra M_{3a}



Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

3.1.6.14. Límites de Atterberg, M_{3a}

El índice de plasticidad de la muestra M_{3a} y su respectivo límite líquido aparecen en la Tabla XXVII:

Tabla XXVII. Datos para determinar límite líquido de la muestra M_{3a}

<i>MUESTRA</i>	<i>LL</i>	<i>IP</i>	<i>CLASIFICACION</i> *	<i>DESCRIPCION DEL SUELO*</i>
<i>No.</i>				
4	61.10	37.20	CH	Arcilla de alta compresibilidad

Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

3.1.6.15. Corte directo, M_{3a}

El ensayo de corte directo sirve para simular las condiciones del suelo y obtener los valores de soporte, cohesión y ángulo de fricción interna del mismo. Los resultados del ensayo de corte directo se muestran en la Tabla XXVIII y la Figura 25:

Tabla XXVIII. Resultados del ensayo de corte directo para la muestra M_{3a}

PARAMETROS DE CORTE:

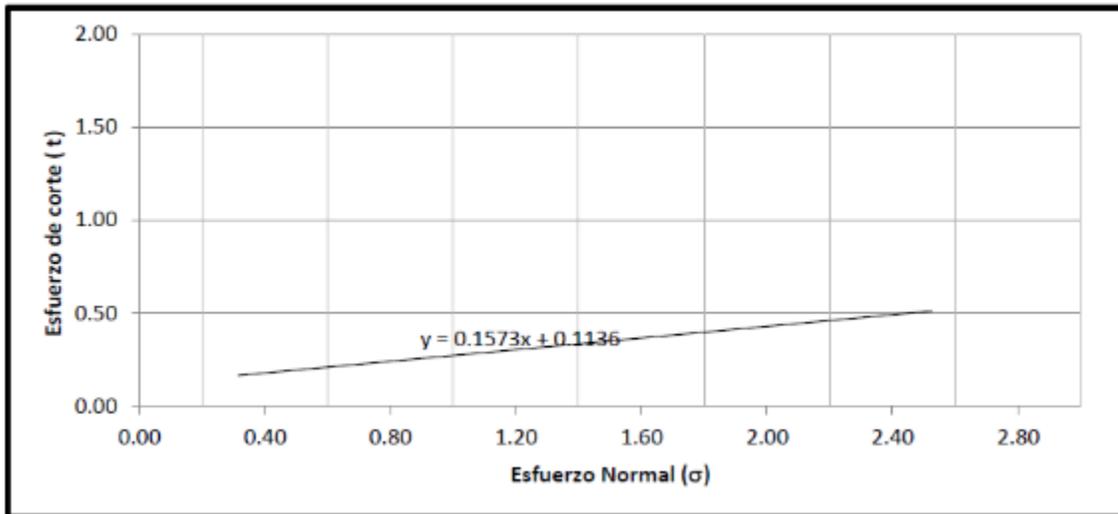
ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 8.9^\circ$	COHESIÓN: $c_u = 1.1 \text{ T/m}^2$
---	-------------------------------------

DESCRIPCION DEL SUELO: Arcilla limosa color café
 DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2,5" X 1,0"
 OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

PROBETA No.	1	2	3	4
ESFUERZO NORMAL (kg/cm ²)	0.32	0.63	1.26	2.53
ESFUERZO DE CORTE (kg/cm ²)	0.07	0.27	0.39	0.47
DENSIDAD HUMEDA (T/m ³)	1.82	1.82	1.82	1.82
HUMEDAD (%H)	51,5	51,5	51,5	51,5

Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

Figura 25. Envoltente de falla, corte directo



Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

3.1.6.16. Consolidación y gravedad específica, M_{3a}

Los datos de interés en la investigación sobre la muestra M_{3a} sobre consolidación y gravedad específica se presentan en las Tablas XXIX y XXX:

Tabla XXIX. **Resultados de consolidación, M_{3a}**

RESULTADOS			
Diámetro interior del molde (cm) :	6.35	Gravedad específica de los sólidos :	2.54
Area de la muestra (cm ²) :	31.67	Altura de sólidos (cm) :	1.01
Altura inicial de la muestra (cm) :	2.54	Relación de vacíos inicial :	1.51
Volumen inicial de la muestra (cm ³) :	80.39	Humedad inicial (%) :	64.8
Densidad Humeda (g/cm ³):	1.67	Densidad Seca (g/cm ³):	1.11
Esfuerzo de preconsolidacion (kg/cm ²):	1.05	Esfuerzo de sobrecarga (kg/cm ²):	0.94
Coef. De compresion	0.29	Coef. Expansion:	0.015

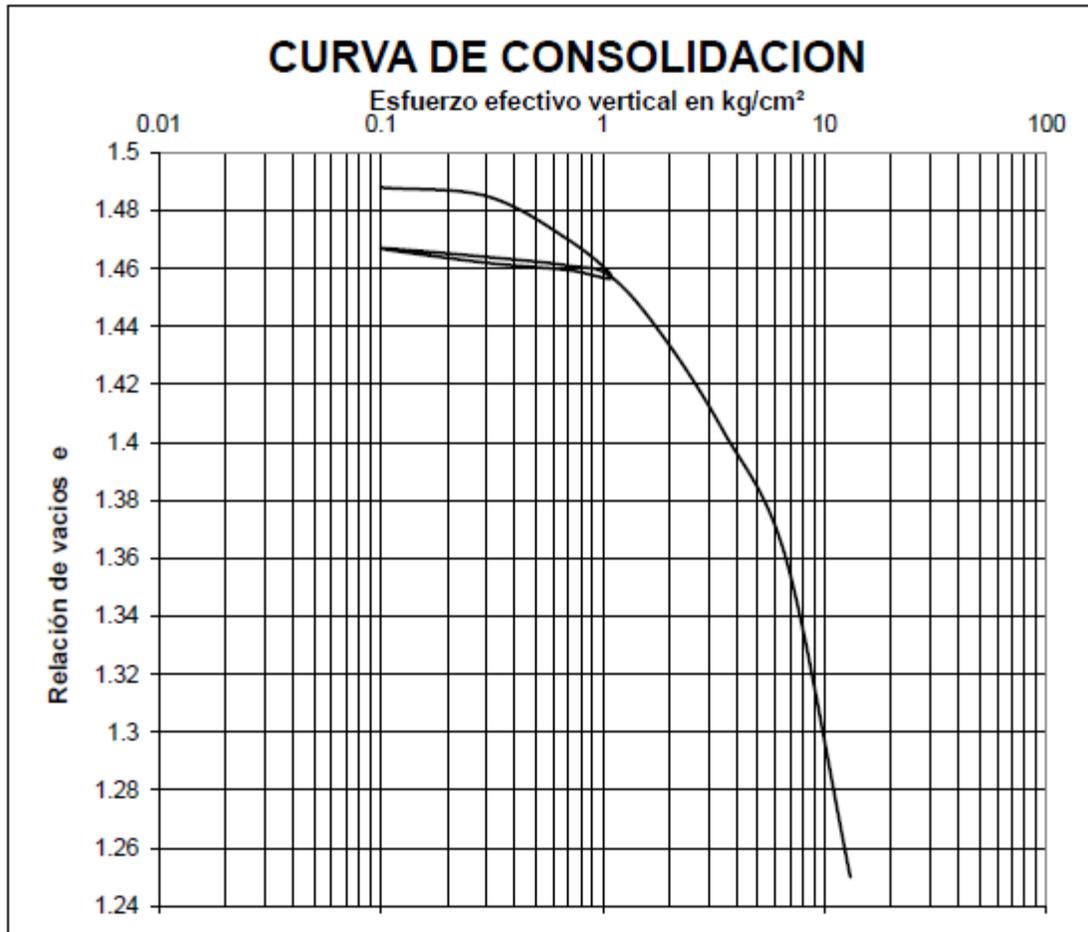
Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

Tabla XXX. **Datos para elaborar curva de compresibilidad, M_{3a}**

PARAMETROS DE CONSOLIDACION							
Presion kg/cm ²	Lectura (10 ⁻²)	Deformacion	Espesor	Relacion de vacios	Tiempos (min)		Coef. Consolidacion
					T50	T90	
0	0	0	25.40	1.515	0	0	0
0.1	27.94	0.28	25.12	1.487	1.3	2	1.14E-06
0.30	38.1	0.38	25.02	1.477	1.3	2	1.14E-06
0.70	48.26	0.48	24.92	1.467	2.7	4	5.71E-07
1.10	58.42	0.58	24.82	1.457	2.7	4	5.71E-07
1.90	78.7	0.79	24.61	1.437	1.3	2	1.14E-06
3.50	111.76	1.12	24.28	1.404	4.0	6	3.81E-07
6.70	156.11	1.56	23.84	1.360	2.7	4	5.71E-07
18.10	287.88	2.88	22.52	1.230	5.3	8	2.85E-07

Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

Figura 26. Curva de consolidación muestra M_{3a}



Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

3.1.6.17. Granulometría, M_{3b}

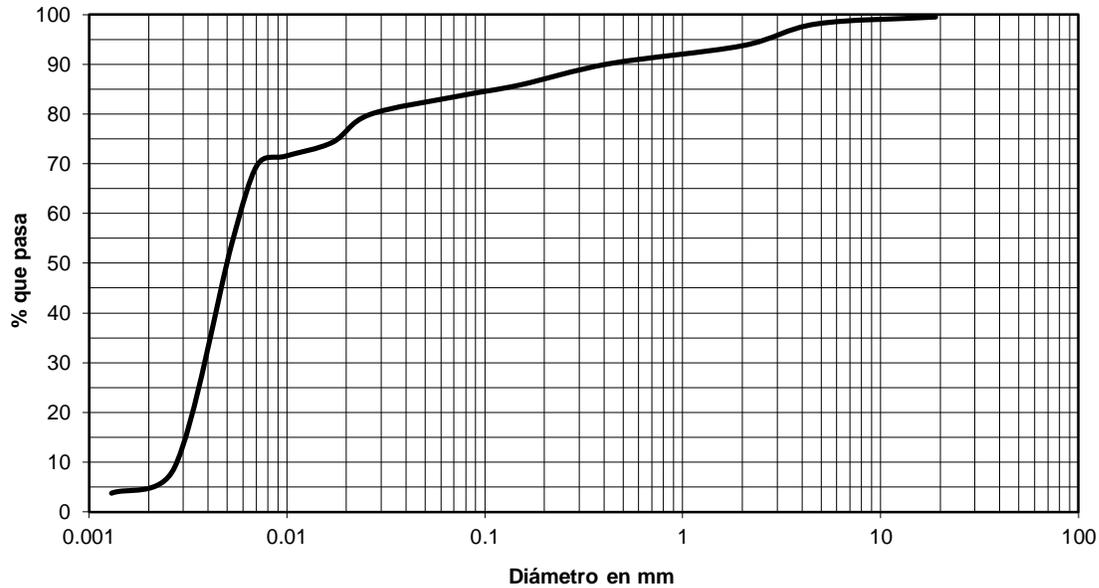
Los resultados del ensayo granulométrico efectuado a la muestra se presentan en la Tabla XXXI. y Figura 27:

Tabla XXXI. **Granulometría de la muestra M_{3b}**

	Diámetro	% que pasa
Tamiz	25.4	100
	19	99.5
	4.75	98.11
	2.00	93.71
	0.425	90.10
	0.150	85.81
	0.074	83.60
Hidrómetro	0.02615	79.86
	0.01700	74.29
	0.00984	71.51
	0.007065	69.65
	0.005274	53.95
	0.002709	8.91
	0.001300	3.71

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. Curva granulométrica de la muestra M_{3b}



Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

3.1.6.18. Límites de Atterberg, M_{3b}

La muestra M_{3b} es una arcilla de alta plasticidad, cuyos resultados se reflejan en la Tabla XXXIII:

Tabla XXXII. Datos para determinar límite líquido de la muestra M_{3b}

<i>MUESTRA</i>	<i>LL</i>	<i>IP</i>	<i>CLASIFICACION</i> *	<i>DESCRIPCION DEL SUELO*</i>
<i>No.</i>				
5	50.20	30.20	CH	Arcilla de alta compresibilidad

Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

3.1.6.19. Corte directo, M_{3b}

El ensayo de corte directo sirve para simular las condiciones del suelo y obtener los valores de soporte, cohesión y ángulo de fricción interna del mismo. Los resultados del ensayo de corte directo se muestran en la Tabla XXXIII y la Figura 28:

Tabla XXXIII. **Resultados del ensayo de corte directo para la muestra M_{3b}**

PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 9.6^\circ$	COHESIÓN: $c_u = 1.6 \text{ T/m}^2$
---	---

DESCRIPCION DEL SUELO: Arcilla limosa color café

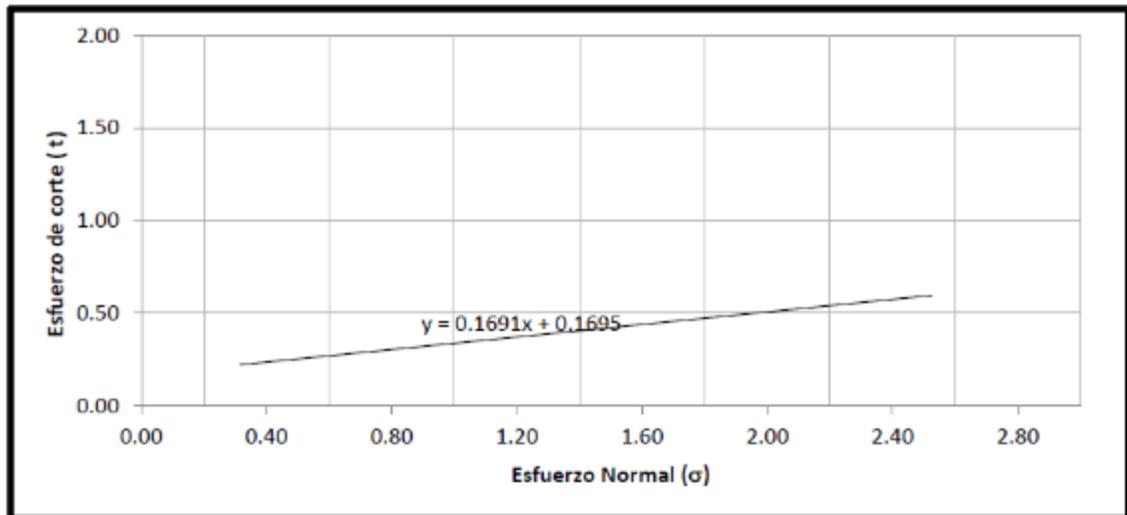
DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 1.0"

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

PROBETA No.	1	2	3	4
ESFUERZO NORMAL (kg/cm^2)	0.32	0.63	1.26	2.53
ESFUERZO DE CORTE (kg/cm^2)	0.15	0.32	0.44	0.56
DENSIDAD HUMEDA (T/m^3)	1.80	1.80	1.80	1.80
HUMEDAD (%H)	42.5	42.5	42.5	42.5

Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Envolvente de falla, corte directo**



Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

3.1.6.20. Consolidación y gravedad específica, M_{3b}

Los datos de interés en la investigación sobre la muestra M_{3b} sobre consolidación y gravedad específica se presentan en las Tablas XXXIV y XXXV:

Tabla XXXIV. **Resultados de consolidación, M_{3b}**

RESULTADOS			
Diámetro interior del molde (cm) :	6.35	Gravedad específica de los sólidos :	2.6
Area de la muestra (cm ²) :	31.67	Altura de sólidos (cm) :	1.25
Altura inicial de la muestra (cm) :	2.54	Relación de vacíos inicial :	1.03
Volumen inicial de la muestra (cm ³) :	80.39	Humedad inicial (%) :	40.9
Densidad Humeda (gm/cm ³) :	1.81	Densidad Seca (gm/cm ³) :	1.28
Esfuerzo de preconsolidación (kg/cm ²) :	1.4	Esfuerzo de sobrecarga (kg/cm ²) :	0.91
Coef. De compresion	0.27	Coef. Expansion:	0.007

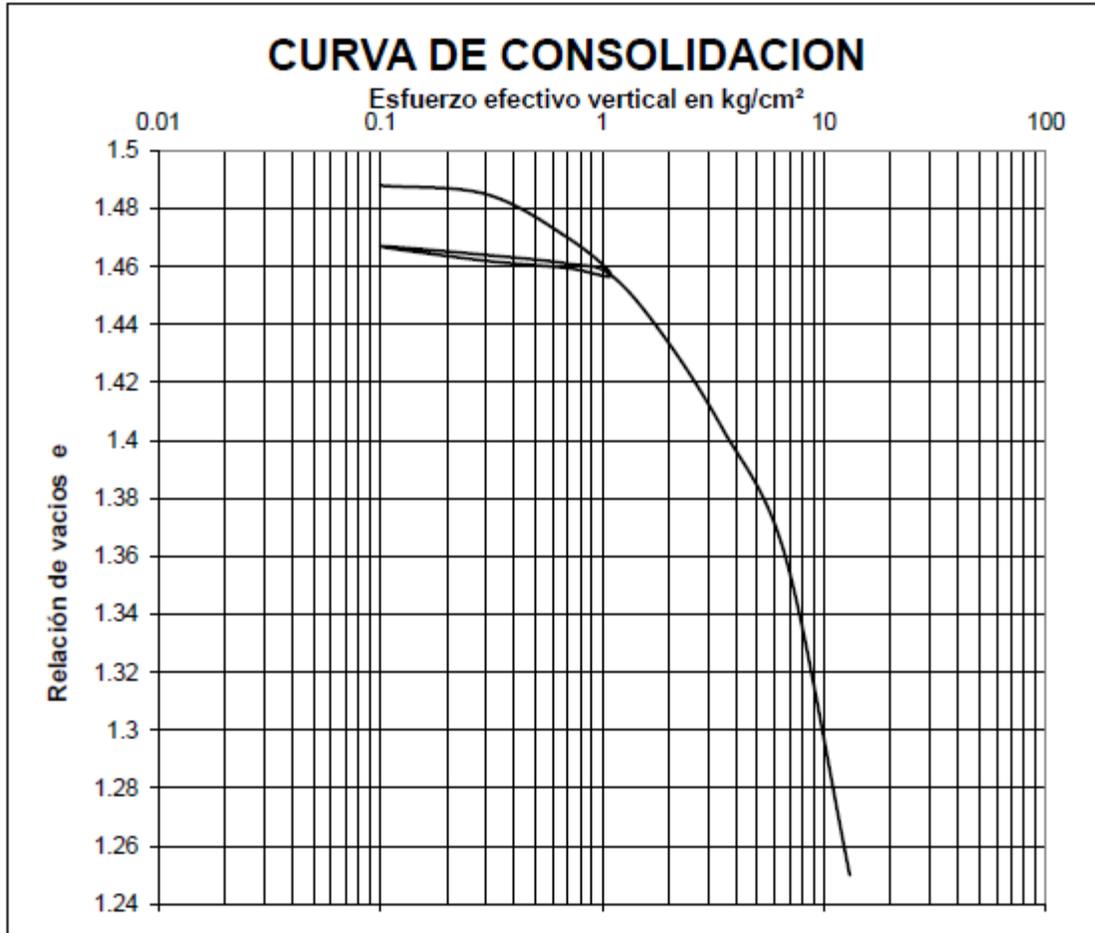
Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

Tabla XXXV. **Datos para elaborar curva de compresibilidad, M_{3b}**

PARAMETROS DE CONSOLIDACION							
Presion kg/cm ²	Lectura (10 ⁻²)	Deformacion	Espesor	Relacion de vacios	Tiempos T50 (min) T90		Coef. Consolidacion
0	0	0	25.400	1.03	0	0	0
0.1	1.27	0.01	25.387	1.031	2.1	8	2.85E-07
0.30	2.29	0.02	25.377	1.030	5.1	8	1.52E-07
0.70	4.83	0.05	25.352	1.028	4.4	15	1.52E-07
1.10	11.94	0.12	25.281	1.022	8.5	8	3.81E-08
1.90	30.48	0.30	25.095	1.008	17.2	8	7.61E-08
3.50	64.51	0.65	24.755	0.980	33.3	30	3.81E-08
6.70	114.44	1.14	24.256	0.940	58.3	15	1.90E-08
18.10	176.2	1.76	23.638	0.891	90.9	60	1.27E-08

Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

Figura 29. Curva de consolidación muestra M_{3b}



Fuente: Laboratorio de suelos GeoCon.

3.2. Presentación de resultados

Los resultados de los ensayos de laboratorio efectuados a las muestras de arcilla seleccionadas, se presentan a partir de la clasificación químico-mineralógica a la que pertenecen junto a sus propiedades físico-mecánicas:

Tabla XXXVI. **Resultados de ensayos de laboratorio de la muestra M₁**

Identificación de la Muestra:	M ₁ (El Hongo)
Coordenadas (GTM):	N 0518700 E 1632389
Clasificación mineralógica:	Caolín
Mineral predominante:	Sílice 22.10%
Clasificación granulométrica:	CL, A-7-5.
Límite líquido:	40.70
Índice de plasticidad:	19.00
Cohesión:	0.9 Ton/m ²
Ángulo de fricción interna:	10.80°
Gravedad específica:	2.5
Coeficiente de expansión:	0.01
Coeficiente de compresión:	0.26

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Resultados de ensayos de laboratorio de la muestra M_{2a}**

Identificación de la Muestra:	M _{2a} (Escobal)
Coordenadas (GTM):	N 0532500 E 1599500
Clasificación mineralógica:	Halloysita
Mineral predominante:	Sílice 33.6%
Clasificación granulométrica:	CL, A-7-5
Límite líquido:	48.30
Índice de plasticidad:	29.27
Cohesión:	1.30 Ton/m ²
Ángulo de fricción interna:	11.90°
Gravedad específica:	2.54
Coeficiente de expansión:	0.04
Coeficiente de compresión:	0.31

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Resultados de ensayos de laboratorio de la muestra M_{2b}**

Identificación de la Muestra:	M _{2b} (Escobal)
Coordenadas (GTM):	N 0532500 E 1599500
Clasificación mineralógica:	Halloysita
Mineral predominante:	Sílice 30.93%
Clasificación granulométrica:	Cl, A-7-5
Límite líquido:	43.10
Índice de plasticidad:	23.60
Cohesión:	1.30 Ton/m ²
Ángulo de fricción interna:	13.00°
Gravedad específica:	2.64
Coeficiente de expansión:	0.015
Coeficiente compresión:	0.31

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Resultados de ensayos de laboratorio de la muestra M_{3a}**

Identificación de la Muestra:	M _{3a} (Escobal)
Coordenadas (GTM):	N 0535400 E 1600700
Clasificación mineralógica:	Montmorillonita
Mineral predominante:	Sílice 30.65%
Clasificación granulométrica:	CH, A-7-5
Límite líquido:	61.10
Índice de plasticidad:	37.20
Cohesión:	1.10 Ton/m ²
Ángulo de fricción interna:	8.90°
Gravedad específica:	2.54
Coeficiente de expansión:	0.015
Coeficiente de compresión:	0.29

Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Resultados de ensayos de laboratorio de la muestra M_{2b}**

Identificación de la Muestra:	M _{3b} (Escobal)
Coordenadas (GTM):	N 0535400 E 1600700
Clasificación mineralógica:	Montmorillonita
Mineral predominante:	Sílice 30.72%
Clasificación granulométrica:	CH, A-7-5
Límite líquido:	50.20
Límite plástico:	30.20
Cohesión:	1.60 Ton/m ²
Ángulo de fricción interna:	9.60°
Gravedad específica:	2.6
Coeficiente de expansión:	0.007
Coeficiente de compresión:	0.27

Fuente: elaboración propia.

3.3. Interpretación de resultados obtenidos

Luego de analizar los resultados de las pruebas realizadas en laboratorio, tanto para las propiedades químico-mineralógicas como físico-mecánicas, se presenta la interpretación geotécnica de los mismos, a partir de la formación geológica a la que pertenecen.

3.3.1. Interpretación de resultados, muestra M₁

La muestra M₁ pertenece al grupo de la Caolinita, cuyo mineral predominante es el Sílice, presente en un 22.10% de la misma, con contenidos importantes de hierro 6.72% y aluminio 12.03%. La clasificación granulométrica indica que son arcillas bajas, lo que indica una baja compresibilidad.

Para fines geotécnicos, la extracción del mineral cuyo uso puede ser cerámico, se debe tener cuidado con la saturación y conformación de los frentes de explotación, la estabilización de los estratos se complica por su bajo coeficiente de compresibilidad.

3.3.2. Interpretación de resultados, muestra M_{2a}

La muestra M_{2a} pertenece al grupo de la Halloysita, cuyo mineral predominante es el Sílice, presente en un 33.60% de la misma, el Aluminio 6.61% elemento que mayor aporta presencia después del principal. La clasificación granulométrica indica que es una arcilla baja, con valor de compresibilidad calculado en 0.31.

Geológicamente, se debe tomar en cuenta que el aumento de silicio en la muestra, denota una reducción en el porcentaje de aluminio, sin embargo existe un aumento del coeficiente de compresión, calculado en 0.31.

3.3.3. Interpretación de resultados, muestra M_{2b}

La muestra M_{2b} pertenece al grupo de la Halloysita, cuyo mineral predominante es el Sílice presente en un 30.93% de la misma, el Aluminio 9.12% el elemento que mayor aporta presencia después del principal. La clasificación granulométrica indica que es una arcilla baja, con valores de compresibilidad calculado en 0.31, no presenta variación respecto a la otra muestra tomada en el mismo sitio.

Al igual que la muestra M_{2a}, geológicamente el contenido de aluminio disminuye al aumentar el contenido de sílice y viceversa.

3.3.4. Interpretación de resultados, muestra M_{3a}

La muestra M_{3a} pertenece al grupo de la Montmorillonita, cuyo mineral predominante es el Sílice, presente en un 30.65% de la misma, el Aluminio 9.56% el elemento que mayor aporta presencia después del principal. La clasificación granulométrica indica que es una arcilla alta, o bien, alta compresibilidad, misma calculada en 0.29, con un índice de plasticidad de 37.20.

En geotécnia, las arcillas altas, son aquellas que mayores dificultades causan por su capacidad de absorción, que al momento de secarse producen grandes asentamientos diferenciales dependiendo del espesor del estrato arcilloso.

3.3.5. Interpretación de resultados, muestra M_{3b}

La muestra M_{3a} pertenece al grupo de la Montmorillonita, cuyo mineral predominante es el Sílice, presente en un 30.72% de la misma, el Aluminio 9.05% el elemento que mayor aporta presencia después del principal. La clasificación granulométrica indica que es una arcilla alta, o bien, alta compresibilidad, con un valor calculado en 0.27 e índice de plasticidad 30.20.

Para fines geotécnicos, las arcillas de alta plasticidad son relacionadas frecuentemente con el término expansivas, por su alta capacidad de absorción de agua y aumento de volumen. Una arcilla con alta plasticidad que se encuentra totalmente seca, causa fisuras en el suelo o estrato donde se encuentra, al momento de saturarse las condiciones cambian abruptamente y de no ser tratadas de forma técnica provocan grandes problemas.

4. PARÁMETROS FÍSICO-MECÁNICOS OBTENIDOS, DE LAS ARCILLAS MUESTREADAS, SEGÚN LA CLASIFICACIÓN QUÍMICO-MINERALÓGICA

Para conocer las variaciones de los parámetros obtenidos en laboratorio, se realizaron correlaciones sobre las muestras de arcilla y de esta forma obtener un panorama general de los cambios que presentan las mismas derivado de su formación geológica.

4.1. Comparación de resultados

Tal y como se mencionó en el inicio del capítulo 2, las formaciones geológicas se seleccionaron derivado de la edad y período geológico al que pertenecen, por lo que se puede considerar como primera diferencia de la muestra, su antigüedad. Luego se debe considerar que dichas muestras pertenecen a grupos y formaciones geológicas distintas, que a pesar de ser tomadas en la zona oriente del país se extienden a lo largo de toda la franja sur del bloque Chortí, tal como se mostró en las Figuras 9, 10 y 11 en los numerales 2.3.1., 2.3.2. y 2.3.3. respectivamente.

Las diferencias físico-mecánicas y químico-mineralógicas, presentadas en el capítulo 3, y su respectiva interpretación, permiten que los mismos puedan presentarse de forma sistemática y así analizar sus diferencias a partir de los valores cuantitativos de las mismas, tal como se muestra en las Tablas XLI y XLII.

Tabla XLI. Tabla comparativa de resultados químico-mineralógicos

	Identificación de las muestras				
	M1 (El Progreso)	M2a (Santa Rosa)	M2b (Santa Rosa)	M3a (Santa Rosa / Jalapa)	M3b (Santa Rosa / Jalapa)
Silicio, % masa	22.10	33.6	30.93	30.65	30.72
Aluminio, % masa	12.03	9.12	9.56	9.05	8.95
Bario, % masa	0.37	0.05	0.06	0.07	0.08
Calcio, % masa	0.29	0	0.16	0	0
Hierro, % masa	6.72	1.12	1.87	2.34	2.51
Magnesio, % masa	1.21	0.29	0.59	0.87	0.94
Manganeso, % masa	0.02	0.01	0.003	0.02	0.01
Estroncio, mg/Kg	0.02	0.004	0.004	0.005	0.003
Grupo de arcilla al que pertenece	Caolín	Caolín	Caolín	Montmorillonita	Montmorillonita
Tipo de arcilla	Caolinita	Halloysita	Halloysita	Montmorillonita	Montmorillonita
Ocurrencia	Suelos, Rocas encajantes	Suelos	Suelos	Suelos, bentonita	Suelos, bentonita
Origen	Meteorización	Meteorización	Meteorización	Hidrotermal	Hidrotermal
Periodo o Era geológica	Paleozoica	Terciaria	Terciaria	Cuaternaria	Cuaternaria
Formación geológica	Unidad Pzm	Unidad I	Unidad I	Unidad Qp	Unidad Qp

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLII. Tabla comparativa de resultados físico-mecánicos

	Identificación de las muestras				
	M1 (El Progreso)	M2a (Santa Rosa)	M2b (Santa Rosa)	M3a (Santa Rosa / Jalapa)	M3b (Santa Rosa / Jalapa)
Clasificación granulométrica S.C.U.:	CL	CL	CL	CH	CH
Límite líquido %:	40.70	48.30	43.10	61.10	50.20
Índice de plasticidad %:	19.00	29.27	23.60	37.20	30.20
Ángulo de fricción interna (corte directo):	10.80°	11.90°	13.00°	8.90°	9.60°
Cohesión (corte directo) Ton/m ² :	0.90	1.30	1.30	1.10	1.60
Gravedad específica:	2.5	2.54	2.64	2.54	2.6
Coefficiente de expansión:	0.01	0.04	0.015	0.015	0.007
Coefficiente de compresión:	0.26	0.31	0.31	0.29	0.27

Fuente: elaboración propia.

Tal como se observó en las tablas anteriores, a pesar de que las muestras presentan propiedades distintas, los datos no presentan un alto grado de dispersión entre sí, lo cual se confirma con la elaboración y análisis de las correlaciones presentadas en los numerales siguientes.

4.2. Análisis de variaciones obtenidas

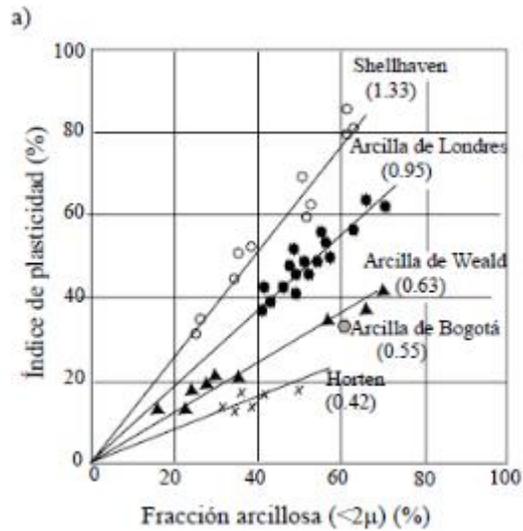
Por simple inspección se pueden determinar las diferencias cuantitativas entre las muestras, sin embargo, existen parámetros evaluados en otras investigaciones sobre las cuales se comparan los resultados obtenidos en la presente.

4.2.1. Relación entre porcentaje de arcillas respecto a índice de plasticidad

En la tesis doctoral denominada “Estudio de la retracción y el agrietamiento en arcillas, aplicación en la arcilla de Bogotá”, el autor dentro del inciso titulado “Propiedades geotécnicas generales” comenta lo siguiente:

En cuanto al tamaño de las partículas, se analizaron las muestras por el método de sedimentación con hidrómetro. “La fracción de arcilla (C) presentó variaciones entre 61% y 63%, la fracción de limo (M) entre 32% y 35% y la fracción de arena fina (S) entre 4% y 5%. La actividad (A), definida como el índice de plasticidad sobre el porcentaje de arcilla en peso ($A = IP/C$) presento variaciones entre 0.52 y 0.57, lo cual representa una actividad relativamente baja al compararla con otras arcillas, como la de WELD ($A=0.63$), la de Londres ($A=0.95$) o la de Shellhaven ($A=1.33$), (Skempton (1953) en Lambe & Withman, 1979).” (Ávila, 2004)

.Figura 30. Relación de índice de plasticidad y fracción arcillosa



Fuente: (Ávila, 2004).

La fracción de arcilla de las muestras analizadas en la investigación, se identifican como arcillas del bloque Chortí, se encuentran entre 52.00% hasta 61.30%, un poco por debajo de las analizadas por (Ávila, 2004), que oscilan entre 61.00% hasta 63.00%.

Se calculó el factor A, para las arcillas investigadas dando como resultado los factores presentados en la tabla XLIII.

Tabla XLIII. **Cálculo de valores A**

Muestra	C	IP	A
M1	52.00	19.00	0.3654
M2a	61.30	29.27	0.4775
M2b	52.00	23.60	0.4538
M3a	52.00	37.20	0.7154
M3b	55.00	30.20	0.5491

Fuente: elaboración propia.

Una vez conocido el valor A, para las arcillas investigadas, se procede a comparar con otros valores conocidos, de formaciones arcillosas, presentado en la tabla XLIV.

Tabla XLIV. **Comparación valores A, respecto a otras arcillas investigadas**

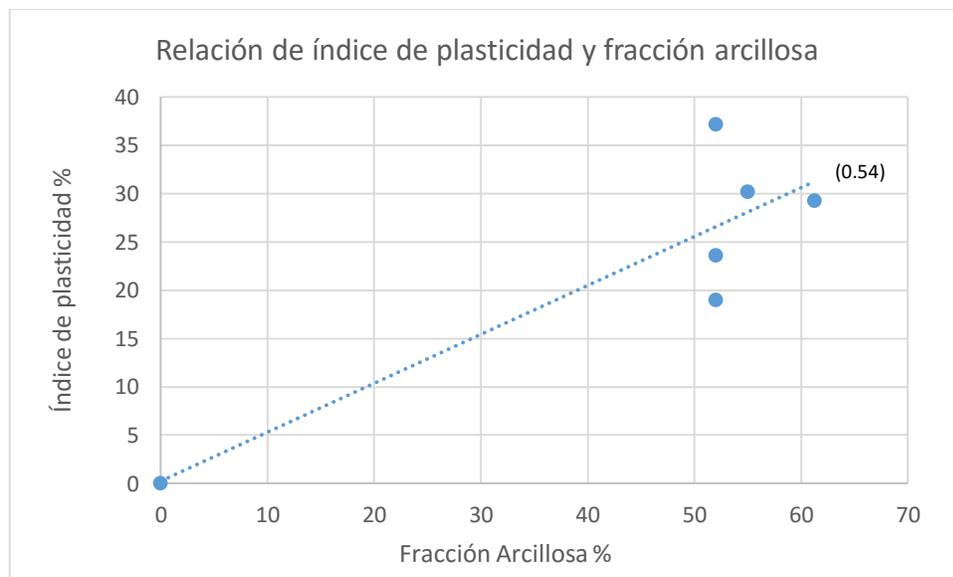
Muestra	A	A (Ávila)	A (Londres)	A (Weld)	A (Shellhaven)
M1	0.37	0.52 - 0.57	0.95	0.63	1.33
M2a	0.48	0.52 - 0.57	0.95	0.63	1.33
M2b	0.45	0.52 - 0.57	0.95	0.63	1.33
M3a	0.72	0.52 - 0.57	0.95	0.63	1.33
M3b	0.55	0.52 - 0.57	0.95	0.63	1.33

Fuente: elaboración propia.

El promedio de valores A de las muestras del bloque Chortí, es de 0.54, situándolas en una tendencia muy parecida a las presentadas por (Ávila, 2004).

El valor A, sirve para clasificar y relacionar de forma lógica, las propiedades mineralógicas representadas por la fracción arcillosa de la muestra, con un elemento mecánico, tal como el índice de plasticidad. La figura 31, muestra la tendencia de dicho valor.

Figura 31. **Gráfica de relación A, arcillas bloque Chortí**



Fuente: elaboración propia.

La dispersión de valores es notable, la muestra M₁ se encuentra muy por debajo respecto a los valores de las arcillas de Bogotá, esto debido a que su grado de meteorización es bastante alto; las muestras M_{2a} y M_{2b}, son similares en sus valores del coeficiente A; M_{3a} y M_{3b} presentan valores distintos; sin embargo por encima del resto, asociado a su formación residual y capacidad plástica presentada.

4.2.2. Resistencia al Cortante, ángulo de fricción

“La cohesión y la fricción entre las partículas o bloques varían considerablemente de acuerdo al tipo de suelo, contenido de minerales, dimensión y morfología de los átomos, presión de poro, humedad y la génesis del material. Adicionalmente, cuando ha ocurrido anteriormente un movimiento, la cohesión y la fricción son menores en especial, en zonas cercanas a las superficies de fractura o fallas geológicas.” (Suárez, 2009)

Respecto al ángulo de fricción en las arcillas, (Suárez, 2009) comenta: “En ensayos realizados en materiales de Neisses y mineral granítico en Colombia, se encuentran variaciones de 26° a 38°, análogos a los indicados por Patton y Deere (1971), para materiales de Lutitas entre 10° y 35° y para materiales de areniscas entre 25° y 45°, en concordancia a los valores propuestos por Sowers - 1981. En materiales derivados de areniscas, el autor ha encontrado ángulos de fricción a lo largo de discontinuidades rellenas de arcilla con valores de 10° a 15°”

Tabla XLV. **Comparación de ángulos de fricción interna**

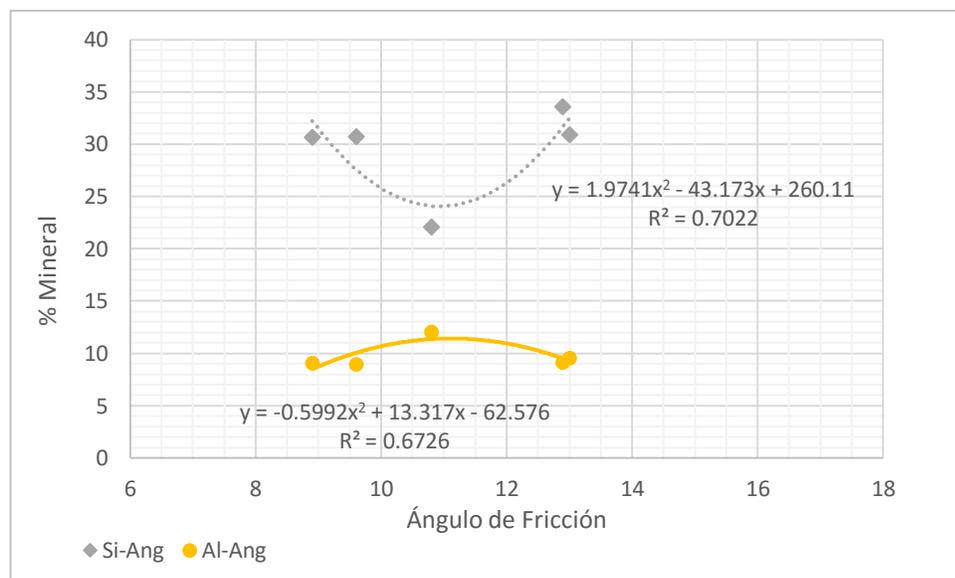
Muestra	Ángulo de Fricción	Origen	Tipo	Ángulo de fricción Esperado
M ₁	10.80°	Meteorización	Lutita	10°-35°
M _{2a}	11.90°	Meteorización	Relleno	10°-15°
M _{2b}	13.00°	Meteorización	Relleno	10°-15°
M _{3a}	8.90°	Hidrotermal	Arenisca - Relleno	10°-15°
M _{3b}	9.60°	Hidrotermal	Arenisca - Relleno	10°-15°

Fuente: elaboración propia.

Se identificó que algunos valores obtenidos se encuentran por debajo de los ángulos esperados según lo indicado por Suárez; sin embargo, el comportamiento en general es similar a otras investigaciones realizadas.

Se realizó de forma adicional, una correlación entre el contenido de los minerales dominantes en las muestras, sílice y aluminio, para determinar el comportamiento de los mismos respecto al ángulo de fricción, dando como resultado la siguiente gráfica:

Figura 32. **Correlación del ángulo de fricción vrs. contenido de Si y Al**



Fuente: elaboración propia.

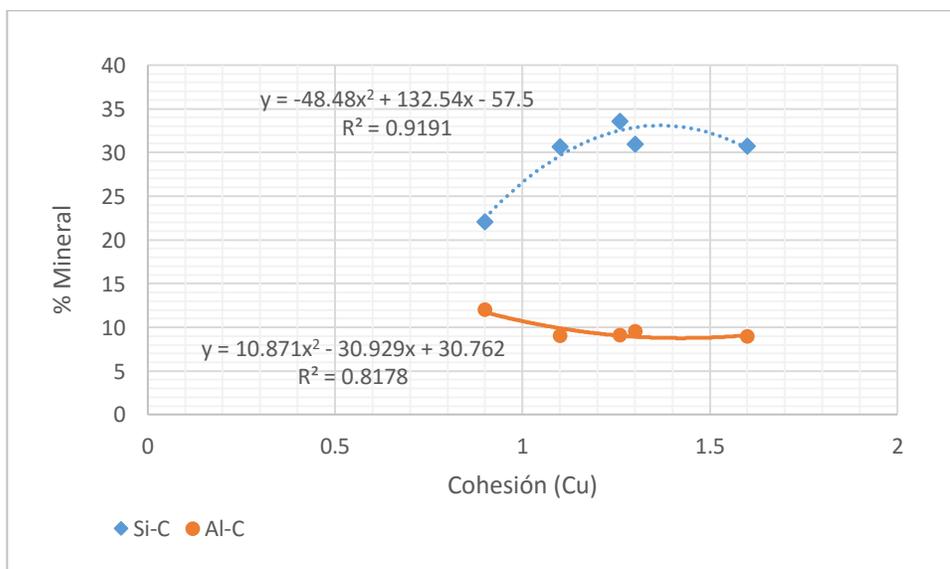
La tendencia de las gráficas indican que para el mismo ángulo de fricción interna, los minerales se comportan de forma inversa, es decir, a medida que aumenta el sílice, disminuye la cantidad de aluminio y viceversa. Ésta afirmación debe ser comprobada con otras investigaciones que soporten la misma.

4.2.3. Resistencia al Cortante, cohesión

“La cohesión es una propiedad determinante en el comportamiento de un suelo residual. En suelos no saturados hay una cohesión aparente, la cual es el producto de las presiones negativas en el agua de poros, la cual desaparece por saturación, sin embargo en muchos casos, la cohesión es debida a la cementación de productos precipitados (Sowers - 1985).” (Suárez, 2009)

Al igual que la fricción interna, se realizaron correlaciones respecto a la cohesión, para determinar el comportamiento de ambos minerales, la gráfica presenta lo siguiente:

Figura 33. Correlación de cohesión vrs. contenido de Si y Al



Fuente: elaboración propia.

La gráfica muestra un comportamiento similar a la presentada en la figura 31, donde para valores constantes de cohesión, el comportamiento de los

minerales predominantes en las arcillas es similar. Aumenta el sílice a medida que disminuye el aluminio.

4.2.4. Análisis de propiedades mecánicas de las arcillas

El comportamiento mecánico de las muestras investigadas al compararlo con información existente, afirma que el mayor actor en las diferencias que presentan las arcillas, no solo del bloque Chortí, sino en general, son derivadas de los procesos de meteorización a las que se somete.

Respecto a los aspectos mineralógicos tal y como se menciona en el inciso 2.4.6. a medida que crecen las concentraciones de óxidos y alúmina, se lava el sílice, mismo que se comprueba en las correlaciones de los minerales predominantes respecto a factores mecánicos de resistencia al cortante, donde se observa que el crecimiento del aluminio, es directamente proporcional a la disminución del sílice.

4.2.4.1. Caracterización de las arcillas formadas por suelo residual

Las arcillas del bloque Chortí se caracterizan por ser residuales, es decir, formadas por la meteorización de bloques en su mayor parte de origen volcánico, así como, producto del metamorfismo característico de la zona.

A diferencia del bloque Maya, donde se encuentran arcillas marinas, la caracterización de arcillas residuales según lo expresado por (Suárez, 2009), debe contener los siguientes factores mecánicos:

Tabla XLVI. **Caracterización de suelos residuales**

Elemento	Factores a caracterizar	Procedimiento
Propiedades Mecánicas	Resistencia al cortante, Cohesión y, ángulo de fricción de la masa de suelo y de las discontinuidades, envolventes de falla, Relación de vacíos, Permeabilidad. Factores que afectan estas propiedades.	Ensayos de campo y de laboratorio. Resistencia al cortante, permeabilidad, Peso unitario, relación de vacíos, porosidad.

Fuente: (Suárez, 2009, pág. 188).

Para cubrir los aspectos mencionados anteriormente, en la presente investigación, se realizaron ensayos de corte directo sobre muestras remoldeadas, así como, ensayos de consolidación donde se evalúan los demás elementos citados por (Suárez, 2009). Los resultados se muestran en las tablas del capítulo 3, y tablas resumen al inicio del presente capítulo.

4.2.4.2. Ensayos en arcillas residuales

Es común en sectores con geología variada, como el caso de las zonas investigadas, encontrar muestras con diversos contenidos de tipo de suelos, (Suárez, 2009) respecto a los ensayos comenta:

“La validez de los ensayos de laboratorio en arcillas residuales es discutible aunque se puede olvidar que son útiles para la toma de decisiones de

diseño. Muestras inalteradas en su totalidad, aunque son difíciles de lograr, son anheladas y es recomendable que los volúmenes sean lo más grande posibles. En algunos casos como en “Coluviones” las pruebas de laboratorio son inapropiadas y sólo aquellos ensayos en el sitio dan resultados con cierto grado de confiabilidad.”

Aquellos ensayos realizados a estratos arcillosos, deben ir enfocados con objetivos específicos, dependiendo del tipo y magnitud de obra geotécnica a realizar, sin embargo, se debe poner especial cuidado en la procedencia de las arcillas y su grado de meteorización, principal actor en el comportamiento mecánico de ellas.

4.3. Propuestas de mejora de suelos arcillosos

Como un valor agregado a la investigación, se conocen los parámetros físico-mecánicos y químico-mineralógicos de las arcillas estudiadas, mismos que pueden ser utilizados de referencia para cualquier tipo de arcilla, se presentan propuestas de mejora de suelos arcillosos.

Los datos presentes en la investigación brindan una idea general del comportamiento de las arcillas; sin embargo, no deben ser utilizados como valores de diseño, como se explicó a lo largo de la investigación, Guatemala es un territorio geológicamente rico, y para los estudios geotécnicos que involucren arcillas similares, se deben tener los valores puntuales del sitio a estudiar.

A continuación se presentan propuestas de mejora de suelo para terrenos arcillosos, que se deben utilizar a criterio del diseñador, una vez comprobados los valores geotécnicos necesarios, aplicables a la obra a desarrollar.

4.3.1. Sustitución de suelo

En casos donde el volumen de arcilla del suelo no es significativo, comparado a la magnitud de la obra a desarrollar, se recomienda realizar una sobre excavación, para eliminar la presencia de arcilla y sustituirlo con material que cumpla con las disposiciones de diseño que la obra necesite.

Esta posibilidad no siempre se plantea en las obras o estudios geotécnicos. “Con frecuencia existen limitaciones económicas, medioambientales o incluso técnicas que limitan este recurso. Es el caso de obras pequeñas, de obras en zonas protegidas en las que es difícil encontrar un vertedero o un préstamo adecuado para la sustitución o, por ejemplo, de obras en las que los suelos arcillosos se encuentran bajo el nivel freático y esto complica su extracción.” (Bauzá, 2006, pág. 31)

4.3.2. Mezcla de suelo

Otra solución común al momento de encontrar arcilla en los suelos, es la mezcla de materiales, que consiste en agregar materiales finos o gruesos con el fin de alcanzar los parámetros físico-mecánicos deseados.

“Con estas mezclas, convenientemente estudiadas y diseñadas, se eliminan fundamentalmente los efectos de plasticidad y de higroscopicidad que afectan al comportamiento mecánico de los suelos arcillosos y, en especial, a su dependencia del nivel de humedad. También se aumenta con este efecto la componente de fricción o rozamiento entre partículas que contribuye a la capacidad portante o resistente de los suelos. Esta componente es menos sensible a la presencia de agua que la cohesión entre partículas, por lo que otro

de los efectos conseguidos es una mayor resistencia y más estabilidad de la misma.” (Bauzá, 2006, pág. 32)

4.3.3. Recompactación de suelo

La saturación de agua en los suelos arcillosos, causa que las partículas de arcilla varíen su volumen considerablemente, así mismo, activa sus propiedades plásticas, puede causar asentamientos en las cimentaciones. Cuando el estrato de suelo arcilloso tiene un volumen considerable y no es viable económicamente realizar la sustitución o mezcla de suelo, se recomienda eliminar la saturación de agua por cualquier método que sea factible para el proyecto.

Los niveles de recompactación de suelos arcillosos regularmente requieren un estudio específico para determinar las condiciones de humedad y energía de compactación para minimizar su sensibilidad. También se puede realizar compactación con el método de precarga, aunque el mismo, tiene costos elevados y requiere tiempos prolongados.

“Otra singularidad de las arcillas es que su baja permeabilidad condiciona los tiempos de efectividad de los procesos de compactación, al ser éstos función de la posibilidad de desalojar el agua de los huecos que se persigue reducir con la densificación y la velocidad a que ese desalojo se realiza. Por ello el estudio anterior debe contemplar lo que se conoce como el proceso de consolidación bajo el mecanismo de compactación que se aplique.” (Bauzá, 2006, pág. 33)

4.3.4. Control de humedad

Tal como se mencionó en el numeral anterior, el control de agua es vital para evitar asentamientos en suelos arcillosos. Para ello, se recomienda diseñar e implementar obras de control de humedad, y con ello evitar, el contacto de fluidos que puedan causar alteraciones en los estratos.

“El principio de este mecanismo de actuación se basa en mantener constantes las características de las arcillas manteniendo fijo su nivel de saturación. En efecto, en ocasiones el problema no es la baja capacidad portante, las deformaciones excesivas o la inestabilidad por sí mismas, sino el riesgo de la variabilidad del comportamiento de las arcillas ante las modificaciones en su saturación.” (Bauzá, 2006, pág. 34)

Los controles básicamente buscan aislar el área de la obra, para mantener los niveles de saturación en los estratos de suelo, así como, proteger los efectos de asentamiento y evitar pérdidas en la obra. Para ello es importante que los estudios previos indiquen los niveles de permeabilidad y consolidación de las muestras.

4.3.5. Mezcla con conglomerantes

“El mecanismo del tratamiento de los suelos arcillosos mediante la adición de productos conglomerantes es quizás una de las soluciones tecnológicamente más avanzadas, pero también una de las más caras.” (Bauzá, 2006, pág. 35)

No se debe olvidar que cualquier tratamiento geotécnico de suelos representa costos adicionales para los proyectos de obra civil, por lo tanto, las

soluciones que se presentan dependen tanto de los factores físico-mecánicos de las arcillas, como de los costos que la solución represente.

4.3.6. Estabilización

Desde el punto de vista geotécnico, la estabilización de suelos es regularmente la mejor opción, siempre y cuando se tengan al alcance los materiales necesarios para realizar la operación, sin olvidar el factor económico.

De los métodos más recurrentes dentro de la estabilización de suelos arcillosos, encontramos el proceso que se realiza con cal, mineral que se agrega al estrato arcilloso y mejora sustancialmente sus propiedades.

La cal básicamente produce dos efectos en las arcillas, el primero asociado a su textura, pues modifica la granulometría y consistencia del suelo; el segundo efecto es el aumento de resistencia que presentan las arcillas tratadas con cal, respecto al valor soporte que presenta una arcilla sin tratamiento. (Bauzá, 2006)

CONCLUSIONES

1. Las diferencias de las propiedades mecánicas de las arcillas derivadas de su formación química-mineralógica son:
 - Color, textura, tamaño de grano y trabajabilidad a partir de su formación geológica.
 - Plasticidad, resistencia al cortante, humedad y consolidación derivados de la meteorización a que hayan sido sometidas.
2. Las diferencias de las propiedades mecánicas de las arcillas residuales que se derivan de su formación geológica, son en mayor parte cualitativas; sin embargo, son los procesos de meteorización los que determinan los cambios significativos en las propiedades cuantitativas, mismas que rigen el comportamiento mecánico de estas.
3. La relación entre índice de plasticidad y porcentaje de arcilla (A), en las arcillas investigadas, se encuentra dentro de un rango de 0.36 a 0.71, debido a que las muestras son de tres tipos distintos, la plasticidad de los caolines debido a su degradación es menor que las otras, reduciendo su porcentaje de sílice y aumentando el aluminio, característica que hace apto el mineral para fines cerámicos y comerciales.
4. La resistencia al cortante, evaluando cohesión y ángulo de fricción interna de las muestras, mediante ensayos de corte directo en modelos remodelados en laboratorio, presenta resultados dentro de parámetros conocidos en relación a otros estudios de arcilla. Dicha resistencia no depende del contenido de mineral en las arcillas, depende directamente

de factores como humedad, grado de meteorización y estado del macizo en que se encuentre el estrato arcilloso.

5. La antigüedad en las formaciones geológicas, debe utilizarse como parámetro inicial en la evaluación de las arcillas, la misma da una referencia del grado de meteorización al que puedan estar sometidas las muestras, a mayor meteorización, se elevaba la probabilidad de encontrar arcillas del grupo del caolín, mientras que a menores grados de meteorización, mayor posibilidad de encontrar montmorillonitas existe. No todas las muestras de la misma edad geológica presentan las mismas características, dependen del entorno en el cual existan.
6. Las arcillas de alta plasticidad CH, presentan índices por encima del 30%, a diferencia de las restantes que se encuentran debajo de dicho valor, este parámetro es utilizado para definir a que grupo pertenecen las muestras, tal como se muestra en la figura 1.
7. La Tabla XLII, registra los valores numéricos obtenidos en los ensayos físico-mecánicos y muestra de forma sencilla y sistemática las diferencias entre las muestras de arcilla seleccionadas. En la misma se puede observar que a pesar de que dichos valores son distintos, están asociados directamente al porcentaje predominante de los minerales que les preceden, producto de la meteorización de los estratos, tal como se muestra en las Tabla XLI.
8. La presencia de oxidación en las arcillas regularmente es superficial y de fácil remoción, sin embargo, de encontrarse hierro en la composición de la misma se debe evaluar como mineral asociado clasificarse dentro de los grupos estructurales mencionados en la presente investigación.

9. Los resultados mecánicos de los ensayos muestran similitudes en todas las muestras, sin embargo son los resultados químicos – geológicos quienes determinan el grupo geológico al que pertenecen las muestras y determinan de forma preliminar las diferencias que cada una pueda tener.
10. La discusión final de los resultados y propuesta para alcanzar los mismos se presenta en el diagrama, véase apéndice 1.

RECOMENDACIONES

1. Cuando se encuentren estratos arcillosos en suelos o macizos rocosos, realizar la caracterización geológica para establecer el grupo estructural al que pertenece la arcilla, así como el grado de meteorización de la misma. Se deben establecer los parámetros principales de estas, previo a tomar decisiones que afecten el desarrollo de las obras geotécnicas.
2. Al realizar ensayos mecánicos sobre estratos con presencia de arcilla, en lo posible se deben conservar muestras no alteradas; sin embargo, las muestras inalteradas reconstruidas en laboratorio, sirven de parámetro de comparación, no de diseño.
3. Previo a realizar ensayos mecánicos, se debe identificar la zona geológica donde se encuentran depositadas las arcillas, debido a que el contenido de aluminio y otros minerales se encuentra condicionado al tipo de formación del mineral; en zonas metamórficas se encuentran minerales residuales, mientras que en zonas sedimentarias son procesos de meteorización.
4. Las arcillas del bloque Chortí, en su mayor parte residuales, deben ser tratadas e identificadas tal como se indica en la Tabla XLVI. Con las muestras reconstruidas en laboratorio, en los ensayos de corte directo, las humedades se controlan de forma que las arcillas se lleven a condiciones extremas, a fin de que el Ingeniero Geotécnico evalúe que condición favorece más al momento del diseño.

5. Las arcillas del bloque maya, en su mayor parte son marinas, estas presentan condiciones distintas a las evaluadas en la investigación, los resultados aquí expuestos no representan el comportamiento a esperar en el bloque mencionado.
6. Los valores presentados en esta investigación, son únicamente comparativos, tal como se planteó a lo largo de la misma, todas las formaciones presentan condiciones distintas, así que los valores de las tablas LV y LVI, se deben utilizar únicamente como base de comparación para los estudios que el diseñador realice.
7. Siempre que se encuentren estratos o depósitos de arcilla en áreas que serán intervenidas por obras estructurales, viales o de cualquier índole, se deben realizar todos los ensayos descritos en la presente investigación, para tener los parámetros mínimos que permitan tomar decisiones que beneficien dichas obras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ávila, G. (2004). *Estudio de la retracción y el agrietamiento de arcillas. Aplicación a la arcilla de Bogotá*. Barcelona.
2. Bateman, A., & Jensen, M. (1981). *Economic Mineral Deposits*. New York: Jhon Wiley & Sons.
3. Bauzá, J. (2006). *El tratamiento de suelos arcillosos mediante cal*. Madrid.
4. Bimbela, C. (2014). *Solución ecológica y sustentable para la disminución de expansión en arcillas mediante perforaciones*. Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro.
5. Carranza-Edwards, A. (2009). Causas y consecuencias de la erosión de playas. *Publica tu Obra*, 2-14.
6. Chiquín, L., & Requena, J. (2001). *Mapeo geológico de superficie del cuadrángulo Granados, Escala 1:50000*. Cobán: Universitaria.
7. Chupina de León, A. M. (2006). *Estudio comparativo entre las técnicas más utilizadas para la fabricación de ladrillos*. Guatemala: Universitaria.
8. Compton, R. (1970). *Geología de Campo*. México D.F.: Pax-México.
9. Cornelius, K., & Cornelius, H. (1981). *Manual of mineralogy*. New York: John Wiley & sons.
10. Corrales, M. (1978). *Estratigrafía*. Madrid: Universitaria.

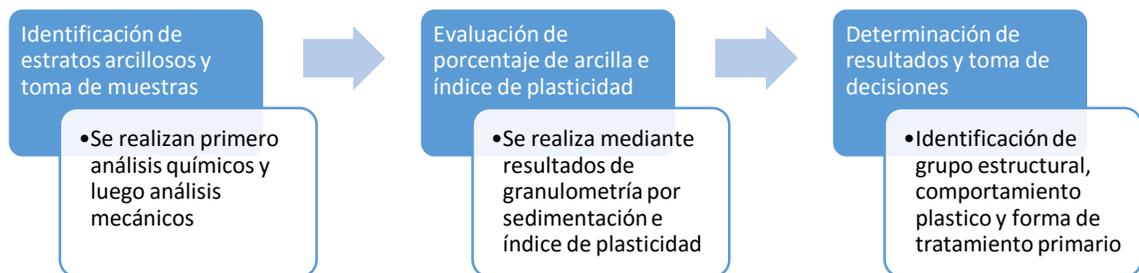
11. De Pablo, L. (1964). Las Arcillas. 1. Clasificación, identificación, usos y especificaciones industriales. *Boletín, Sociedad geológica Mexicana.*, 49-92.
12. Delgado Vargas, M. (2009). *Interacción Suelo-Estructura*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
13. Everlife, S. (2011). *Estudio De Impacto Ambiental, Proyecto de Explotación Minera Niquegua Montufar II*. Guatemala.
14. González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson .
15. Hernández C., J. (2008). *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. Guatemala: USAC.
16. Huacho. (2011). *Metodología de la investigación*. Lima: SCHEM.
17. Madrid, U. C. (10 de Junio de 2014). *Universidad Complutense de Madrid*.
Obtenido de
http://pendientedemigracion.ucm.es/info/diciex/proyectos/agua/esc_sub_porosidad.html
18. Mattauer, M. (1976). *Las deformaciones de los materiales de la corteza terrestre*. Barcelona: Omega.
19. Moya Barrios, J., Salazar Ferro, R., Gómez Agudelo, G., & Salazar Ferro, F. (2010). *Excavaciones en condiciones complejas*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
20. Nadeo, J., & Leoni, A. (1997). *Introducción a algunas propiedades fundamentales de los suelos*. Madrid.
21. Nadeo, J., & Leoni, A. (2011). *Introducción a algunas propiedades fundamentales de los suelos*. Buenos Aires, Argentina.

22. Perez Bol, E. R., & Toledo Sosa, N. D. (1987). *Estudio sobre las arcillas de Panimaquito Purulha B.V.* Cobán, Alta Verapaz, Guatemala.: Universitaria.
23. Pérez, E. (2000). *Léxico estratigráfico del bloque Chortí en Guatemala.* Cobán: Universitaria.
24. Pettijohn, F. (1979). *Rocas Sedimentarias.* Buenos Aires: Paraninfo.
25. Ralph, G. (1968). *Clay Mineralogy.* New York: McGraw-Hill.
26. Ramos Ramírez, E. (2002). Caracterización de arcillas del Estado de Guanajuato y su potencial aplicación en cerámica. *Acta Universitaria, 2.*
27. Suárez, J. (2009). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales.* Bucaramanga: UIS.
28. Suarez, J. (2009). *Deslizamientos, Análisis Geotécnico.* Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
29. Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1973). *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica.* Buenos Aires: El Ateneo.
30. Van Olphen. (1977). *An Introduction to Clay Colloid Chemistry.* New York: Jhon Wiley & Sons.
31. Viers, G. (1973). *Geomorfología.* Barcelona: CIKOS-TAU.
32. Walter, H. (1962). *Petrología.* Mexico: UTHEA.

APÉNDICE

Apéndice 1

Discusión final de resultados y propuesta para alcanzarlos



Fuente: elaboración propia.

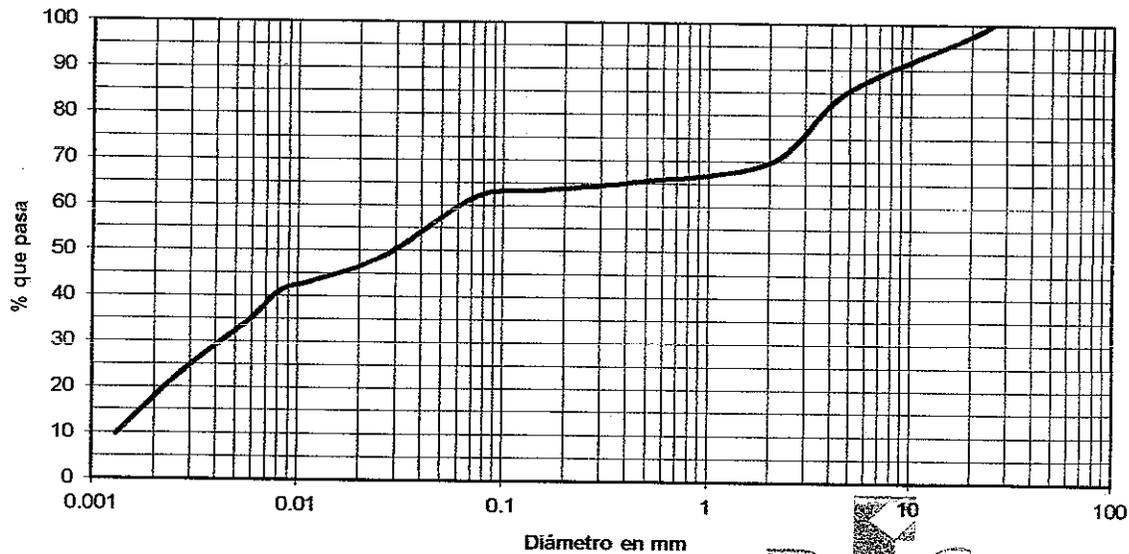
ANEXOS

Informe: 53
Interesado: Sergio Castellanos
Ensayo: Análisis Granulométrico por el metodo del hidrometro
Norma: ASTM D421,
Proyecto: Graduacion
Ubicación: x
Muestra: M1
Profundidad: x

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
1	25.40	100
3/4	19	97.08
4	4.750	85
10	2	69.73
40	0.425	65.29
100	0.15	63.37
200	0.074	62.00

% de grava: 15.00
 % de arena: 23.00
 % de limos: 10.00
 % de arcilla: 52.00

Análisis por Sedimentación:	
Abertura (mm)	% que pasa
0.030	50.45
0.019	46.24
0.0113	43.09
0.0081	40.99
0.0058	34.68
0.0026	22.70
0.0013	9.77



Descripción del suelo: Arcilla limo arenosa color café rojizo
Clasificación: S.C.U.: CL **P.R.A.:** A-7-5
Observaciones: Muestra tomada por Sergio Castellanos



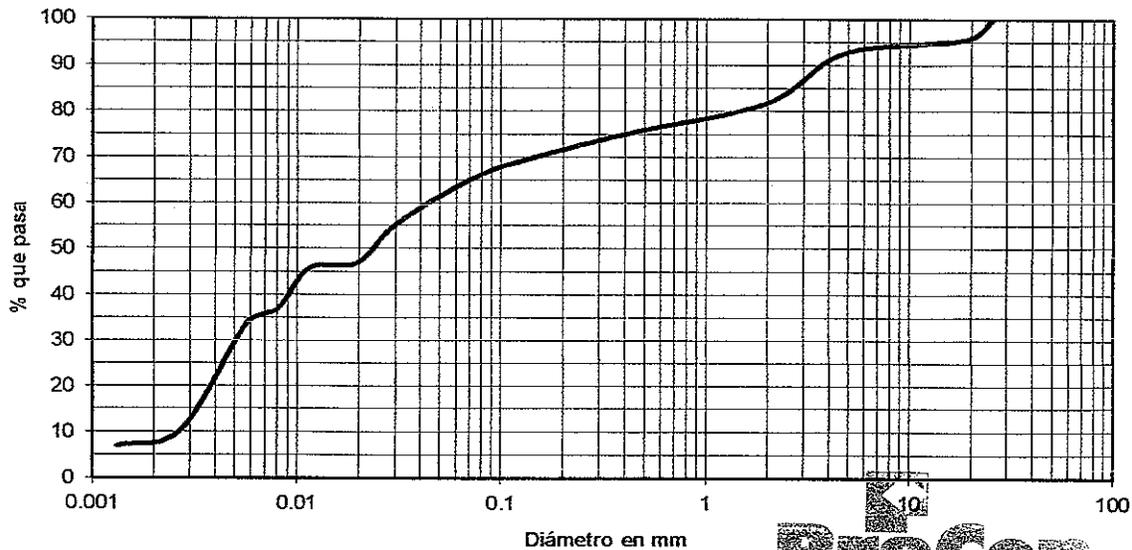
Sergio J. Marroquín Muñoz
INGENIERO CIVIL
COL. No. 12,344

Informe: 52
Interesado: Sergio Castellanos
Ensayo: Análisis Granulométrico por el metodo del hidrometro
Norma: ASTM D421,
Proyecto: Graduacion
Ubicación: x
Muestra: M2a
Profundidad: x

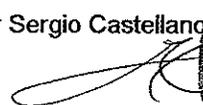
Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
1	25.40	100
3/4	19	95.70
4	4.750	92.7
10	2	81.90
40	0.425	75.30
100	0.15	70.15
200	0.074	65.50

% de grava: 7.30
 % de arena: 27.20
 % de limos: 4.20
 % de arcilla: 61.30

Análisis por Sedimentación:	
Abertura (mm)	% que pasa
0.03037	55.5
0.0196	47.00
0.01149	45.8
0.00806	36.90
0.00567	33.5
0.00270	10.40
0.00131	7.00



Descripción del suelo: Arcilla limosa color beige claro
Clasificación: S.C.U.: CL **P.R.A.:** A-7-5
Observaciones: Muestra tomada por Sergio Castellanos

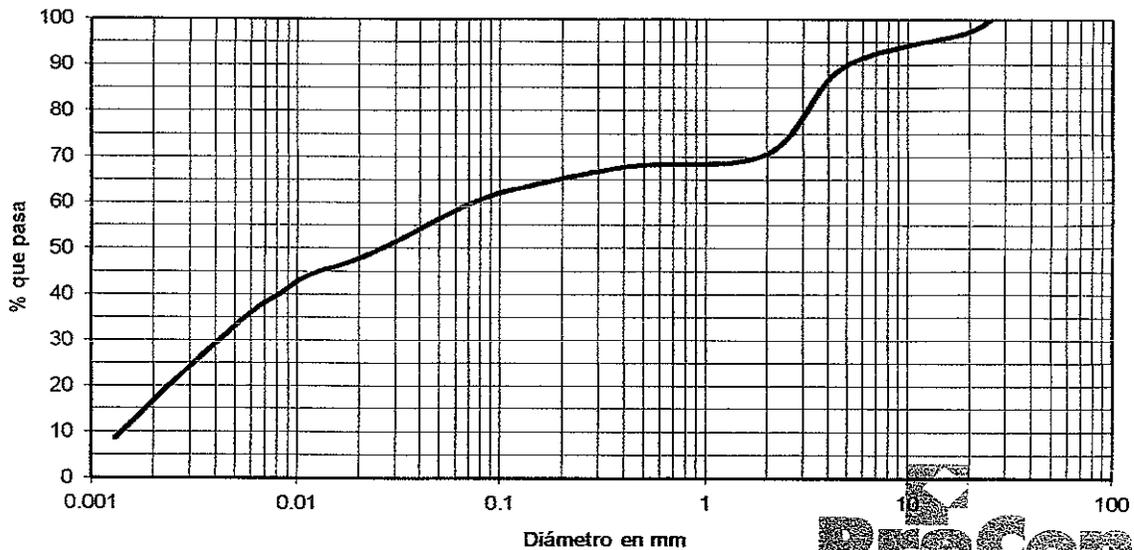

Ernesto J. Marroquín Muñoz
 INGENIERO CIVIL
 COL. No. 12,344

Informe: 55
Interesado: Sergio Castellanos
Ensayo: Análisis Granulométrico por el metodo del hidrometro
Norma: ASTM D421,
Proyecto: Graduacion
Ubicación: x
Muestra: M2b
Profundidad: x

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
1	25.40	100
3/4	19	97.08
4	4.750	89.5
10	2	70.68
40	0.425	67.90
100	0.15	64.00
200	0.074	60.10

% de grava: 10.50
 % de arena: 29.40
 % de limos: 8.10
 % de arcilla: 52.00

Análisis por Sedimentación:	
Abertura (mm)	% que pasa
0.030	51.5
0.019	47.5
0.0113	44.1
0.0081	39.9
0.0058	35.6
0.0026	21.70
0.0013	8.66




 LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD

Descripción del suelo: Arcilla limo arenosa color beige claro
Clasificación: S.C.U.: CL **P.R.A.:** A-7-5
Observaciones: Muestra tomada por Sergio Castellanos

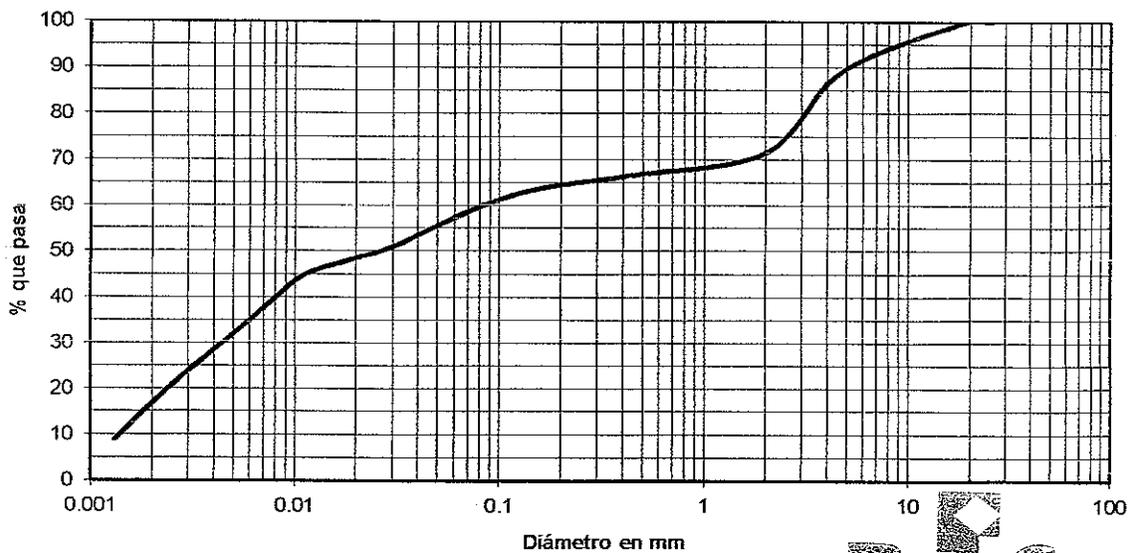

Episto J. Marroquín Muñoz
 INGENIERO CIVIL
 COL. No. 12,344

Informe: 34
Interesado: Sergio Castellanos
Ensayo: Análisis Granulométrico por el metodo del hidrometro
Norma: ASTM D421,
Proyecto: Graduacion
Ubicación: x
Muestra: M3a
Profundidad: x

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
1	25.40	100
3/4	19	100
4	4.750	89.3
10	2	71.44
40	0.425	66.50
100	0.15	63.50
200	0.074	59.10

% de grava: 10.70
 % de arena: 30.20
 % de limos: 7.10
 % de arcilla: 52.00

Análisis por Sedimentación:	
Abertura (mm)	% que pasa
0.030	51.00
0.019	48.30
0.0113	45.10
0.0081	40.10
0.0058	34.50
0.0026	21.60
0.0013	9.0



Descripción del suelo: Arcilla limosa color café
Clasificación: S.C.U.: CH **P.R.A.:** A-7-5
Observaciones: Muestra tomada por Sergio Castellanos



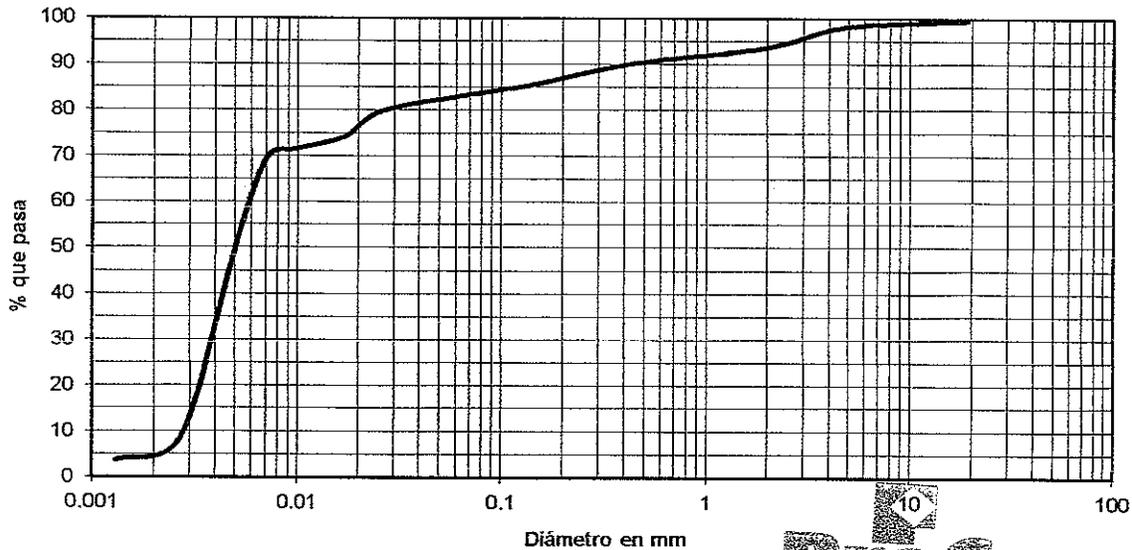
Sergio J. Marroquín Muñoz
INGENIERO CIVIL
COL. No. 12,344
LABORATORIO DE SUELOS
 Avenida el Comercio 1-60 Zona 11, San Miguel Petapa
 Planta 1 ProCon
 PSX. 2528 8288 - Cel. 4081.7331

Informe: 54
Interesado: Sergio Castellanos
Ensayo: Análisis Granulométrico por el metodo del hidrometro
Norma: ASTM D421,
Proyecto: Graduacion
Ubicación: x
Muestra: M3b
Profundidad: x

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
1	25.40	
3/4	19	100
4	4.750	99.50
10	2	95.20
40	0.425	90.10
100	0.15	85.81
200	0.074	83.60

% de grava: 0.50
 % de arena: 15.90
 % de limos: 28.60
 % de arcilla: 55.00

Análisis por Sedimentación:	
Abertura (mm)	% que pasa
0.02615	80.66
0.01700	76.70
0.00984	73.5
0.007065	70.20
0.005274	54.1
0.002709	8.30
0.001300	2.6



Descripción del suelo: Arcilla limo arenosa café claro
Clasificación: S.C.U.: CH **P.R.A.:** A-7-5
Observaciones: Muestra tomada por Sergio Castellanos




Ernesto J. Marroquín Muñoz
 INGENIERO CIVIL
 COL. No. 12,344
 LABORATORIO DE SUELOS
 Avenida el Cementerio 1-00 Zona 11 San Miguel Petapa
 Planta 1 PreCon
 Pbx. 2326 8260 - Cel. 4061 7331



LABORATORIO

Informe: 1
Interesado: Sergio Castellanos
Ensayo: Ensayo de limites de atterberg
Norma: ASHTO T-89 Y T90 Y ASTM D-854
Proyecto: Tesis/USAC
Ubicación: Tesis/USAC

Fecha: 04/03/2015

MUESTRA	LL	IP	CLASIFICACION*	DESCRIPCION DEL SUELO*
No.				
5	50.20	30.20	CH	Arcilla de alta compresibilidad
4	61.10	37.20	CH	Arcilla de alta compresibilidad
3	43.10	23.60	CL	Arcilla de baja compresibilidad
2	48.30	29.27	CL	Arcilla de baja compresibilidad
1	40.70	19.00	CL	Arcilla de baja compresibilidad

*Segun carta de plasticidad

NP: No presenta

LL: Limite Liquido

IP: Indice Plastico



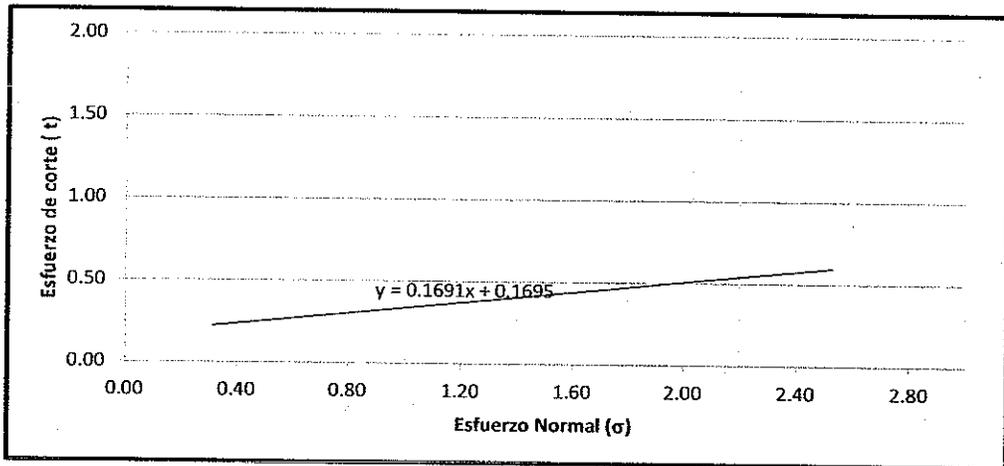
Vo.Bo.

[Signature]
Jefe Laboratorio *[Signature]*
INGENIERO CIVIL
COL. No. 12.344

Informe 5/5

Interesado: Sergio Castellanos
 Asunto: ENSAYO DE CORTE DIRECTO
 NORMA ASTM 3080
 Proyecto: Tesis
 Ubicación: Tesis/USAC
 Profundidad: x
 Fecha: 20 julio de 2015

Muestra : 5



PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 9.6^\circ$	COHESIÓN: $C_u = 1.6 \text{ T/m}^2$
---	-------------------------------------

DESCRIPCION DEL SUELO: Arcilla limosa color café

DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 1.0"

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

PROBETA No.	1	2	3	4
ESFUERZO NORMAL (kg/cm ²)	0.32	0.63	1.26	2.53
ESFUERZO DE CORTE (kg/cm ²)	0.15	0.32	0.44	0.56
DENSIDAD HUMEDA (T/m ³)	1.80	1.80	1.80	1.80
HUMEDAD (%H)	42.5	42.5	42.5	42.5



Vo. Bo.

Ing. Ernesto Marroquín
 Control de Calidad

Ernesto J. Marroquín Muñoz
 INGENIERO CIVIL
 COL. No. 12,344

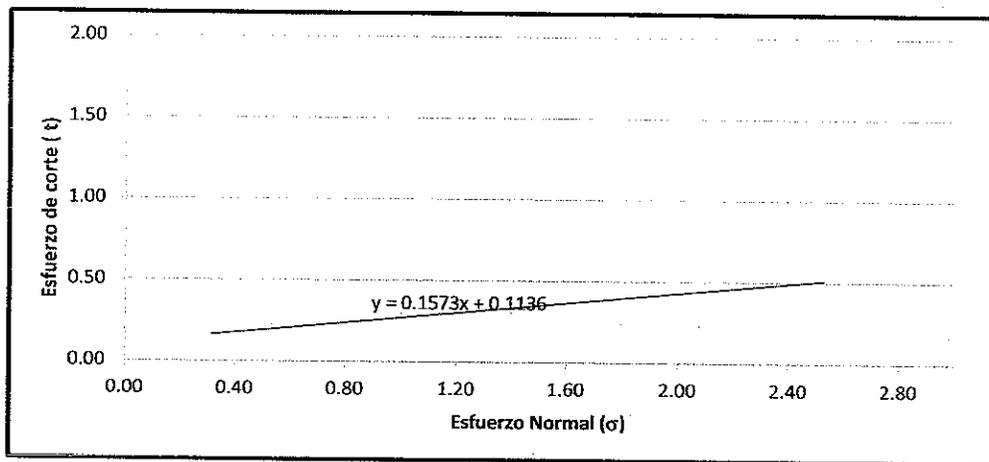


LABORATORIO DE SUELOS
 Avenida el Cementero 1-00 Zona 11, San Miguel Petapa
 Planta 1 PreCon
 P.BX 2328 9080 Cel. 4001 7331

Informe 4/5

Interesado: Sergio Castellanos
 Asunto: ENSAYO DE CORTE DIRECTO
 NORMA ASTM 3080
 Proyecto: Tesis
 Ubicación: Tesis/USAC
 Profundidad: x
 Fecha: 20 julio de 2015

Muestra : 4



PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 8.9^\circ$	COHESIÓN: $C_u = 1.1 \text{ T/m}^2$
---	-------------------------------------

DESCRIPCION DEL SUELO: Arcilla limosa color café
 DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 1.0"
 OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

PROBETA No.	1	2	3	4
ESFUERZO NORMAL (kg/cm^2)	0.32	0.63	1.26	2.53
ESFUERZO DE CORTE (kg/cm^2)	0.07	0.27	0.39	0.47
DENSIDAD HUMEDA (T/m^3)	1.82	1.82	1.82	1.82
HUMEDAD (%H)	51.5	51.5	51.5	51.5



Vo. Bo.

Ing. Ernesto Marroquín
 Control de Calidad

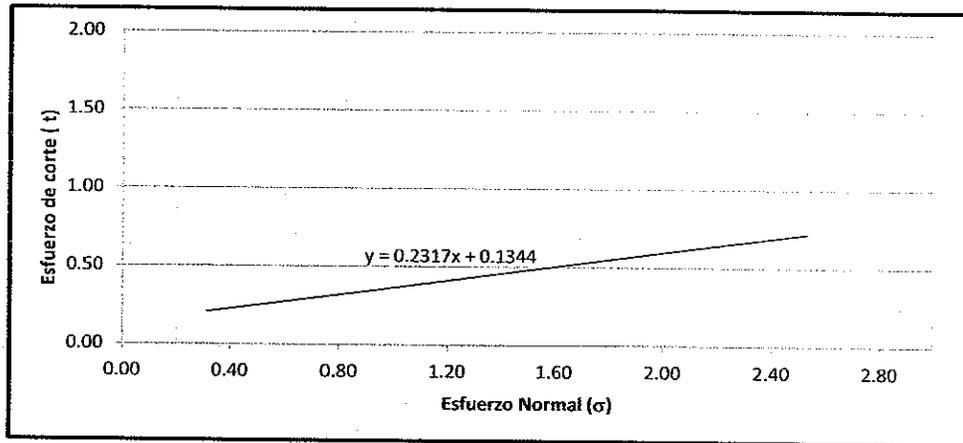
Ernesto J. Marroquín Muñoz
 INGENIERO CIVIL
 COL. No. 12,344



LABORATORIO DE SUELOS
 Avenida de Gomentera 1-00 Zona 11, San Miguel Petapa
 Planta 1 ProCon
 FAX 2326 0300 Cel 4861 7331

Informe 3/5

Interesado: Sergio Castellanos
 Asunto: ENSAYO DE CORTE DIRECTO
 NORMA ASTM 3080
 Proyecto: Tesis
 Ubicación: Tesis/USAC
 Profundidad: x Muestra : 3
 Fecha: 20 julio de 2015



PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 13.0^\circ$	COHESIÓN: $C_u = 1.3 \text{ T/m}^2$
--	-------------------------------------

DESCRIPCION DEL SUELO: Arcilla limo arenosa color beige claro

DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 1.0"

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

PROBETA No.	1	2	3	4
ESFUERZO NORMAL (kg/cm ²)	0.32	0.63	1.26	2.53
ESFUERZO DE CORTE (kg/cm ²)	0.14	0.32	0.49	0.69
DENSIDAD HUMEDA (T/m ³)	1.78	1.78	1.78	1.78
HUMEDAD (%H)	35.1	35.1	35.1	35.1

PreCon S. As. Co. Bo.
 LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD

GeoCon

ing. Ernesto Marroquín Muñoz
 Control de Calidad

Ernesto I. Marroquín Muñoz
 INGENIERO CIVIL
 COL. No. 12,344

LABORATORIO DE SUELOS
 Avenida el Comendante 1.00 Zona 11, San Miguel Petapa
 Montaña 1 PreCon
 PDX 2320 0000 Cel 4001 7331

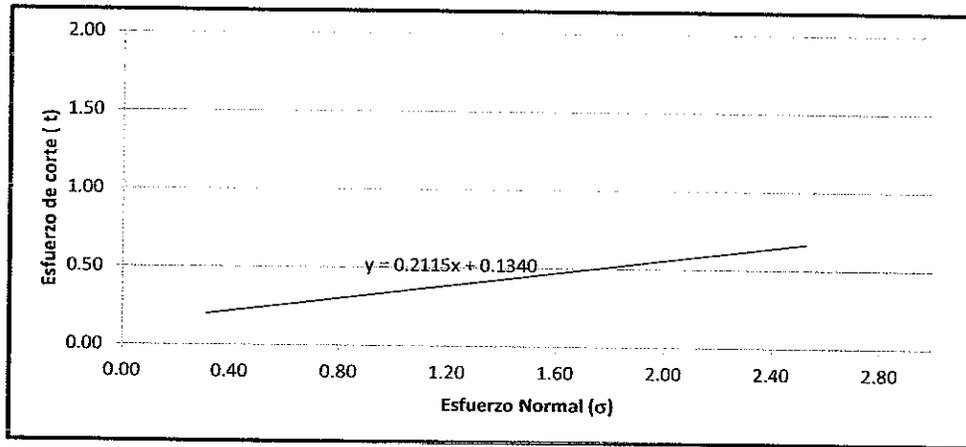
Informe 2/5

Interesado: Sergio Castellanos
 Asunto: ENSAYO DE CORTE DIRECTO
 NORMA ASTM 3080

Proyecto: Tesis
 Ubicación: Tesis/USAC

Profundidad: x
 Fecha: 20 julio de 2015

Muestra : 2



PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 11.9^\circ$	COHESIÓN: $C_u = 1.3 \text{ T/m}^2$
--	-------------------------------------

DESCRIPCION DEL SUELO: Arcilla limosa color beige claro

DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 1.0"

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

PROBETA No.	1	2	3	4
ESFUERZO NORMAL (kg/cm^2)	0.32	0.63	1.26	2.53
ESFUERZO DE CORTE (kg/cm^2)	0.05	0.38	0.49	0.61
DENSIDAD HUMEDA (T/m^3)	1.75	1.75	1.75	1.75
HUMEDAD (%H)	37.1	37.1	37.1	37.1



Vo. Bo.

Ing. Ernesto Marroquin
 Control de Calidad

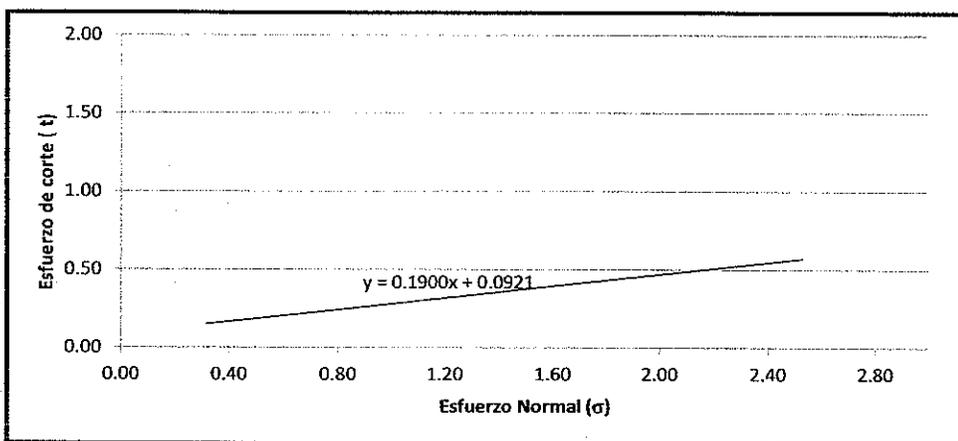


LABORATORIO DE SUELOS
 Avenida del Comodoro 1000 Zona 1 San José
 Costa Rica
 Teléfono: 2520 0000 Fax: 2520 0000

Informe 1/5

Interesado: Sergio Castellanos
 Asunto: ENSAYO DE CORTE DIRECTO
 NORMA ASTM 3080
 Proyecto: Tesis
 Ubicación: Tesis/USAC
 Profundidad: x
 Fecha: 20 julio de 2015

Muestra : 1



PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 10.8$	COHESIÓN: $C_u = 0.9 \text{ T/m}^2$
--	-------------------------------------

DESCRIPCION DEL SUELO: Arcilla limo arenosa color café rojizo

DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 1.0"

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

PROBETA No.	1	2	3	4
ESFUERZO NORMAL (kg/cm ²)	0.32	0.63	1.26	2.53
ESFUERZO DE CORTE (kg/cm ²)	0.04	0.27	0.44	0.52
DENSIDAD HUMEDA (T/m ³)	1.67	1.67	1.67	1.67
HUMEDAD (%H)	35.1	35.1	35.1	35.1

GeoCon
 LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD

Vo. Bo.

Ing. Ernesto Marroquin
 Control de Calidad

Ernesto J. Marroquin Muñoz
 INGENIERO CIVIL
 COL. No. 12,344

Informe: 1/2
Interesado: Sergio Castellanos
Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE SUELOS
Norma: ASTM D-2435
Proyecto: Tesis
Ubicación: Tesis/USAC

Muestra: 1

RESULTADOS			
Diámetro interior del molde (cm) :	6.35	Gravedad específica de los sólidos :	2.5
Area de la muestra (cm ²) :	31.67	Altura de sólidos (cm) :	1.22
Altura inicial de la muestra (cm) :	2.54	Relación de vacíos inicial :	1.08
Volumen inicial de la muestra (cm ³) :	80.39	Humedad inicial (%) :	52.3
Densidad Humeda (g/cm ³) :	1.8	Densidad Seca (g/cm ³) :	1.18
Esfuerzo de preconsolidacion (kg/cm ²) :	0.36	Esfuerzo de sobrecarga (kg/cm ²) :	0.92
Coef. De compresion	0.26	Coef. Expansion:	0.01

PARAMETROS DE CONSOLIDACION							
Presion Kg/cm ²	Lectura (10 ⁻²)	Deformacion	Espesor	Relacion de vacios	Tiempos (min)		Coef. Consolidacion
					T50	T90	
0	0	0	25.40	1.082	0	0	0
0.1	19.05	0.19	25.21	1.066	5	8	5.71E-07
0.30	45.11	0.45	24.95	1.045	5	8	2.85E-07
0.70	88.11	0.88	24.52	1.010	10	15	1.52E-07
1.10	139.0	1.39	24.01	0.968	10	15	1.52E-07
1.90	204.3	2.04	23.36	0.914	20	30	7.61E-08
3.50	257.06	2.57	22.83	0.871	20	30	7.61E-08
6.70	317.67	3.18	22.22	0.822	40	60	3.81E-08
18.10	399.83	4.00	21.40	0.754	80	120	1.90E-08

Observaciones:

Muestra por el interesado

Interesado: Sergio Castellanos

Proyecto: Tesis

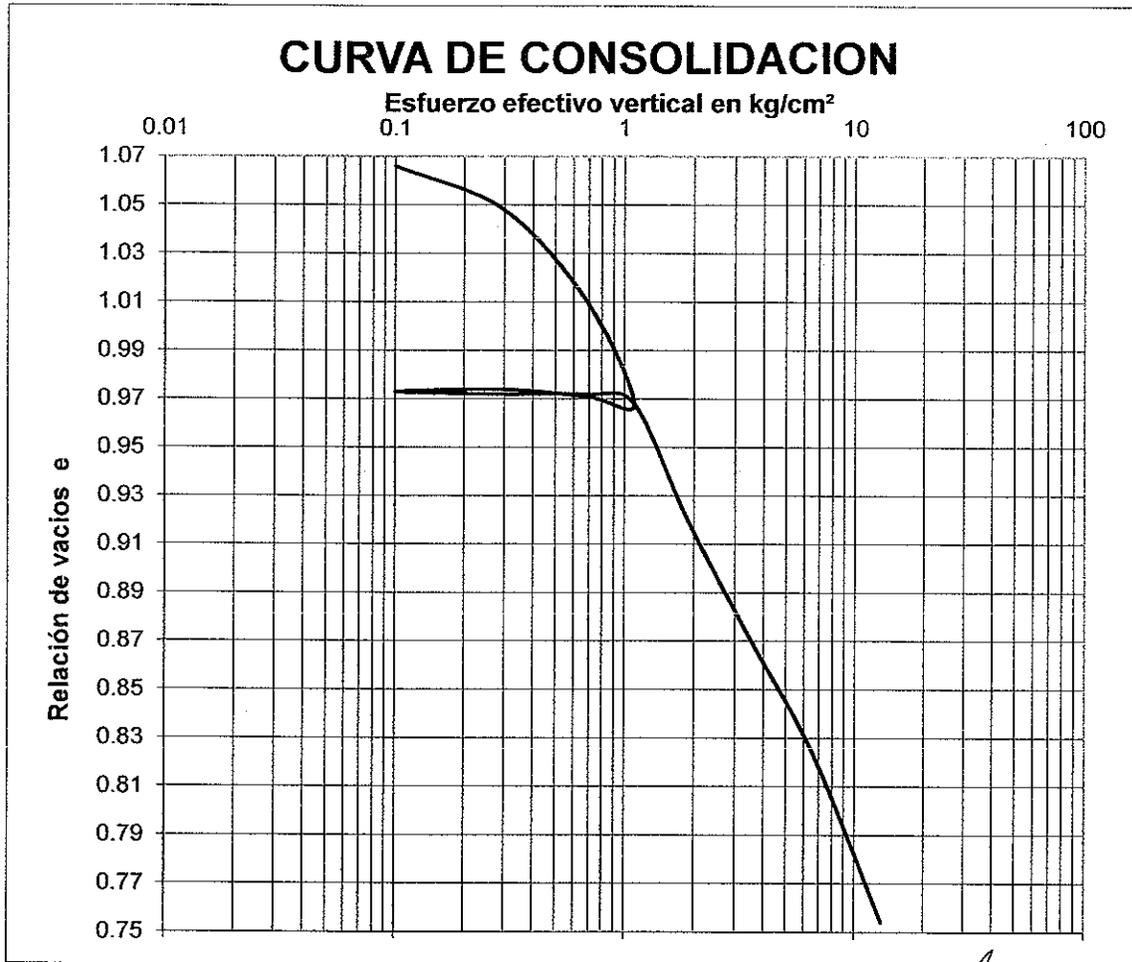
Ubicación: Tesis/USAC

Asunto: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE SUELOS

Fecha: 11 mayo de 2015

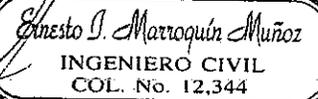
Muestra: 1

Norma: ASTM D-2435



Descripción del Suelo: Arcilla limosa color rojizo

Vo.Bo.

Ing. Ernesto Marroquin
Control de Calidad

Ernesto J. Marroquín Muñoz
INGENIERO CIVIL
COL. No. 12,344

Informe: 1/1
Interesado: Sergio Castellanos
Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE SUELOS
Norma: ASTM D-2435
Proyecto: Tesis
Ubicación: Tesis/USAC

Muestra: 2

Características de la muestra			
Diámetro interior del molde (cm) :	6.35	Gravedad específica de los sólidos :	2.54
Area de la muestra (cm ²) :	31.67	Altura de sólidos (cm) :	0.98
Altura inicial de la muestra (cm) :	2.54	Relación de vacíos inicial :	1.59
Volumen inicial de la muestra (cm ³) :	80.39	Humedad inicial (%) :	65.3
Densidad Humeda (g/cm ³):	1.63	Densidad Seca (g/cm ³):	0.99
Esfuerzo de preconsolidacion (kg/cm ²):	0.9	Esfuerzo de sobrecarga (kg/cm ²):	0.8
Coef. De compresion	0.31	Coef. Expansion:	0.04

PARAMETROS DE CONSOLIDACION							
Presion Kg/cm ²	Lectura (10 ⁻²)	Deformacion	Espesor	Relacion de vacios	Tiempos (min)		Coef. Consolidacion
					T50	T90	
0	0	0	25.40	1.592	0	0	-0
0.1	38.1	0.38	25.02	1.553	1.5	2.5	9.13E-07
0.30	50.8	0.51	24.89	1.540	2.7	5	4.57E-07
0.70	68.58	0.69	24.71	1.522	2.5	4	5.71E-07
1.10	101.6	1.02	24.38	1.488	8.5	15	1.52E-07
1.90	217.0	2.17	23.23	1.370	2.5	4	5.71E-07
3.50	233.57	2.34	23.06	1.354	12.3	20	1.14E-07
6.70	278.66	2.79	22.61	1.307	8.1	14	1.63E-07
18.10	427.77	4.28	21.12	1.155	5.5	8	2.85E-07

Observaciones: Muestra por el interesado

Interesado: Sergio Castellanos

Proyecto: Tesis

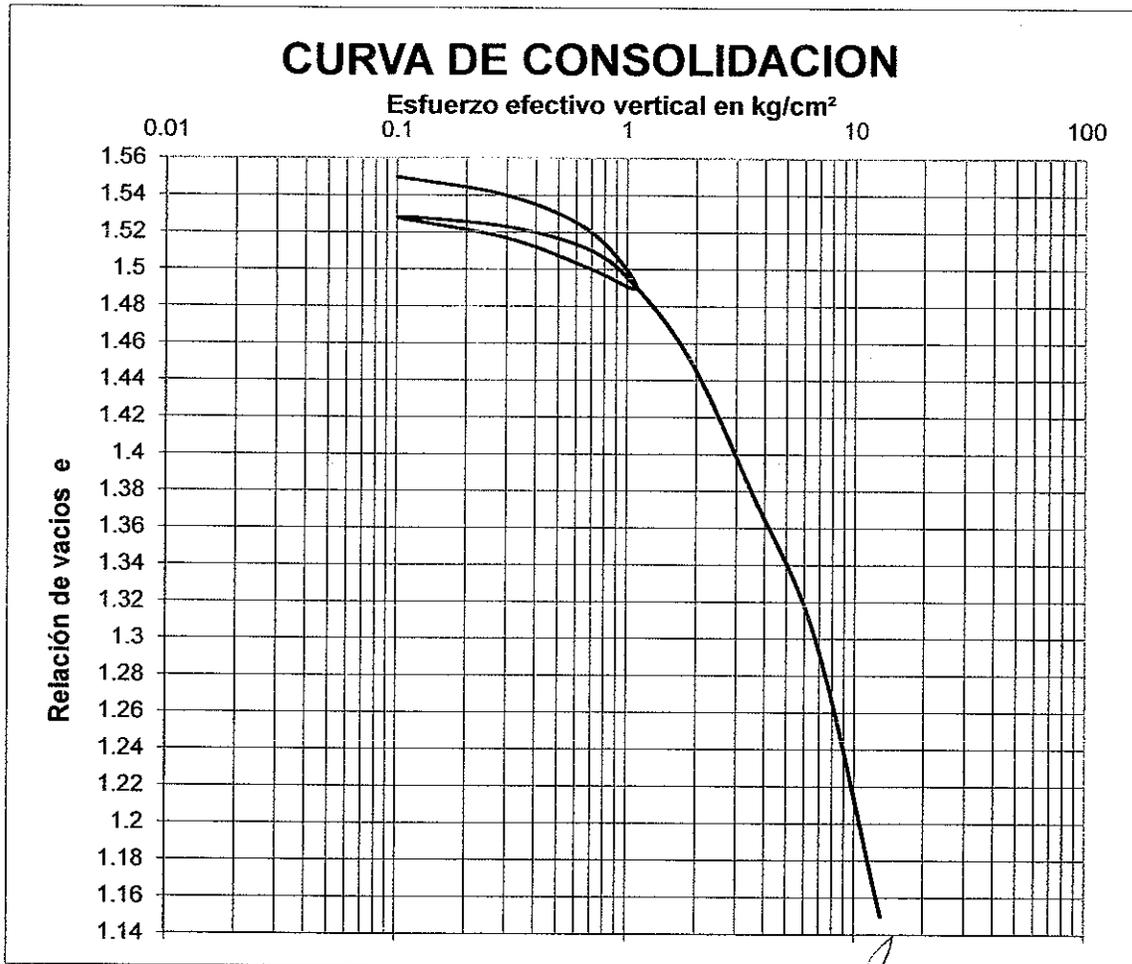
Ubicación: Tesis/USAC

Asunto: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE SUELOS

Fecha: 14 de mayo de 2015

Muestra: 2

NORMA: ASTM D-2435



Descripción del Suelo: Arcilla limo arenosa color rojizo claro

Vo.Bo.

Ing. Ernesto Marroquin
Control de Calidad

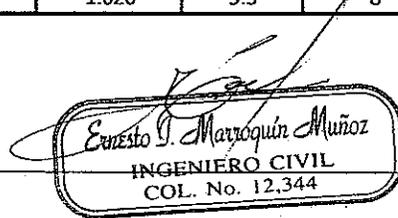
Ernesto I. Marroquín Muñoz
INGENIERO CIVIL
COL. No. 12,344

Informe: 1/2
Interesado: Sergio Castellanos
Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE SUELOS
Norma: ASTM D-2435
Proyecto: Tesis
Ubicación: Tesis/USAC **Muestra:** 3

RESULTADOS			
Diámetro interior del molde (cm) :	6.35	Gravedad específica de los sólidos :	2.64
Area de la muestra (cm ²) :	31.67	Altura de sólidos (cm) :	1.08
Altura inicial de la muestra (cm) :	2.54	Relación de vacíos inicial :	1.35
Volumen inicial de la muestra (cm ³) :	80.39	Humedad inicial (%) :	56.7
Densidad Humeda (g/cm ³) :	1.78	Densidad Seca (g/cm ³) :	1.13
Esfuerzo de preconsolidación (kg/cm ²) :	0.9	Esfuerzo de sobrecarga (kg/cm ²) :	1.6
Coef. De compresion	0.31	Coef. Expansion:	0.015

PARAMETROS DE CONSOLIDACION							
Presion Kg/cm ²	Lectura (10 ⁻³)	Deformacion	Espesor	Relacion de vacios	Tiempos (min)		Coef. Consolidacion
					T50	T90	
0	0	0	25.40	1.352	0	0	0
0.1	21.94	0.22	25.18	1.332	1.3	2	1.14E-06
0.30	30.02	0.30	25.10	1.324	2.7	4	5.71E-07
0.70	45.72	0.46	24.94	1.310	2.7	4	5.71E-07
1.10	58.83	0.59	24.81	1.297	1.3	2	1.14E-06
1.90	111.0	1.11	24.29	1.249	2.0	3	7.61E-07
3.50	191.44	1.91	23.49	1.175	2.0	3	7.61E-07
6.70	274.77	2.75	22.65	1.097	2.7	4	5.71E-07
18.10	352.22	3.52	21.88	1.026	5.3	8	2.85E-07

Observaciones: Muestra por el interesado


Ernesto J. Marroquín Muñoz
 INGENIERO CIVIL
 COL. No. 12,344

Interesado: Sergio Castellanos

Proyecto: Tesis

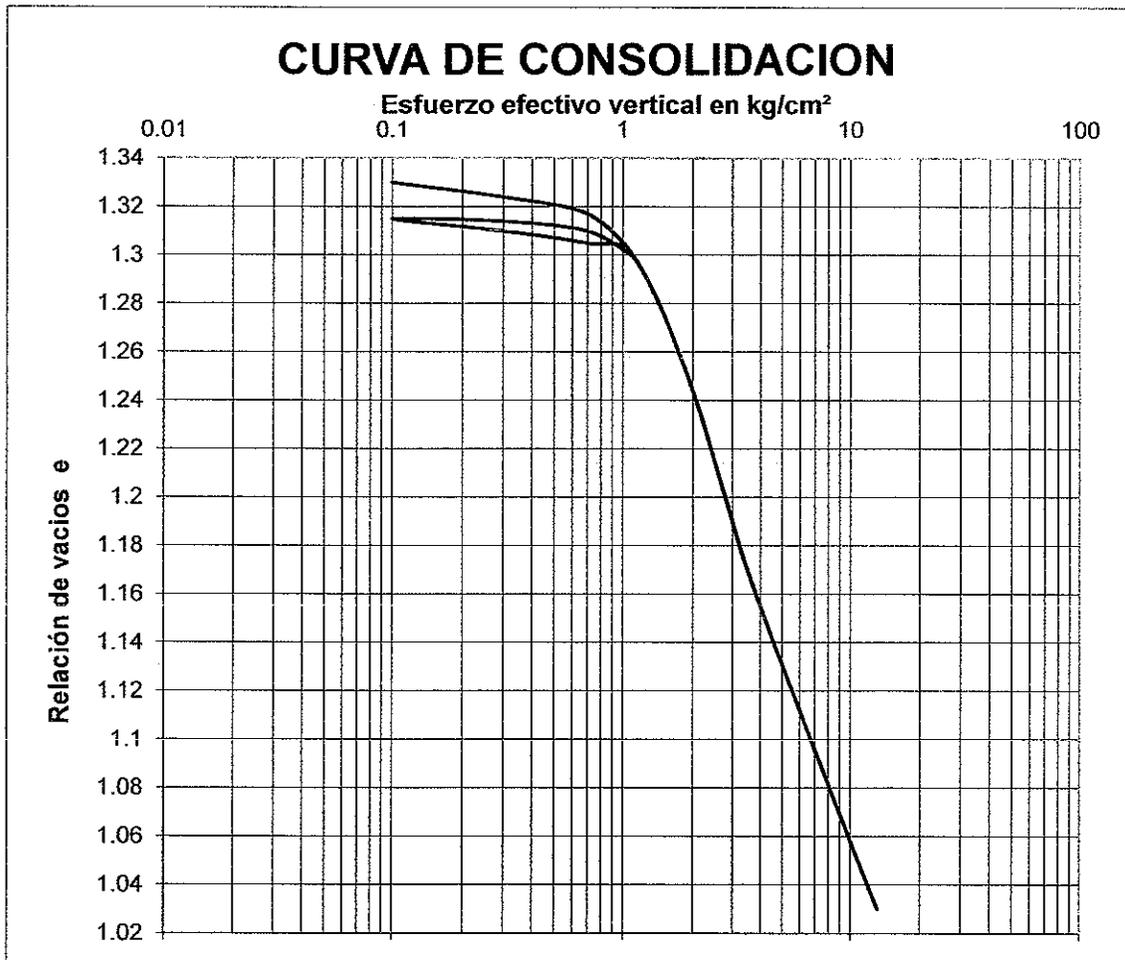
Ubicación: Tesis/USAC

Asunto: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE SUELOS

Fecha: 14 de mayo de 2015

Muestra: 3

NORMA ASTM D-2435

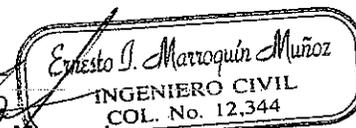


Descripción del Suelo: Arcilla limo arenosa color café



LABORATORIO DE
CONTROL DE CALIDAD

Vo.Bo.

Ing. Ernesto Marroquin
Control de Calidad

Ernesto I. Marroquin Muñoz
INGENIERO CIVIL
COL. No. 12,344

Informe: 1/2
 Interesado: Sergio Castellanos
 Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE SUELOS
 Norma: ASTM D-2435
 Proyecto: Tesis
 Ubicación: Tesis/USAC Muestra: 4

RESULTADOS			
Diámetro interior del molde (cm) :	6.35	Gravedad específica de los sólidos :	2.54
Area de la muestra (cm ²) :	31.67	Altura de sólidos (cm) :	1.01
Altura inicial de la muestra (cm) :	2.54	Relación de vacíos inicial :	1.51
Volumen inicial de la muestra (cm ³) :	80.39	Humedad inicial (%) :	64.8
Densidad Humeda (g/cm ³) :	1.67	Densidad Seca (g/cm ³) :	1.11
Esfuerzo de preconsolidacion (kg/cm ²) :	1.05	Esfuerzo de sobrecarga (kg/cm ²) :	0.94
Coef. De compresion	0.29	Coef. Expansion:	0.015

PARAMETROS DE CONSOLIDACION							
Presion Kg/cm ²	Lectura (10 ⁻²)	Deformacion	Espesor	Relacion de vacios	Tiempos (min)		Coef. Consolidacion
					T50	T90	
0	0	0	25.40	1.515	0	0	0
0.1	27.94	0.28	25.12	1.487	1.3	2	1.14E-06
0.30	38.1	0.38	25.02	1.477	1.3	2	1.14E-06
0.70	48.26	0.48	24.92	1.467	2.7	4	5.71E-07
1.10	58.42	0.58	24.82	1.457	2.7	4	5.71E-07
1.90	78.7	0.79	24.61	1.437	1.3	2	1.14E-06
3.50	111.76	1.12	24.28	1.404	4.0	6	3.81E-07
6.70	156.11	1.56	23.84	1.360	2.7	4	5.71E-07
18.10	287.88	2.88	22.52	1.230	5.3	8	2.85E-07

Observaciones: Muestra por el interesado

Eusebio J. Marroquin Muñoz
 INGENIERO CIVIL
 COL. No. 12,344



Interesado: Sergio Castellanos

Proyecto: Tesis

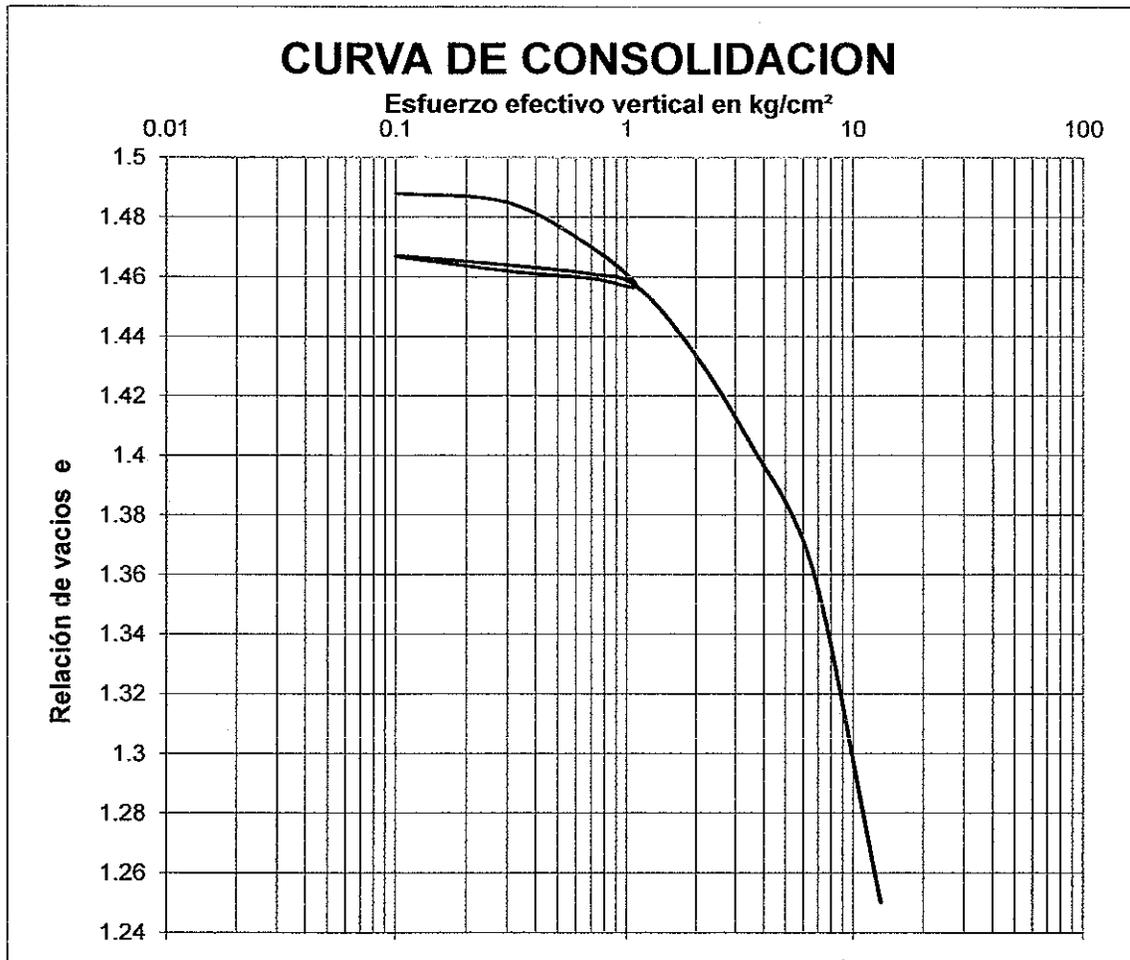
Ubicación: Tesis/USAC

Asunto: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE SUELOS

Fecha: 21 de mayo de 2015

Muestra: 4

NORMA ASTM D-2435



Descripción del Suelo: Arcilla arenosa color café

Vo.Bo.

Ing. Ernesto Marroquin
Control de Calidad

Informe: 1/2
Interesado: Sergio Castellanos
Ensayo: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE SUELOS
Norma: ASTM D-2435
Proyecto: Tesis
Ubicación: Tesis/USAC

Muestra: 5

RESULTADOS			
Diámetro interior del molde (cm) :	6.35	Gravedad específica de los sólidos :	2.6
Area de la muestra (cm ²) :	31.67	Altura de sólidos (cm) :	1.25
Altura inicial de la muestra (cm) :	2.54	Relación de vacíos inicial :	1.03
Volumen inicial de la muestra (cm ³) :	80.39	Humedad inicial (%) :	40.9
Densidad Humeda (gm/cm ³) :	1.81	Densidad Seca (gm/cm ³) :	1.28
Esfuerzo de preconsolidacion (kg/cm ²) :	1.4	Esfuerzo de sobrecarga (kg/cm ²) :	0.91
Coef. De compresion	0.27	Coef. Expansion:	0.007

PARAMETROS DE CONSOLIDACION							
Presion Kg/cm ²	Lectura (10 ⁻²)	Deformacion	Espesor	Relacion de vacios	Tiempos (min)		Coef. Consolidacion
					T50	T90	
0	0	0	25.400	1.03	0	0	0
0.1	1.27	0.01	25.387	1.031	2.1	8	2.85E-07
0.30	2.29	0.02	25.377	1.030	5.1	8	1.52E-07
0.70	4.83	0.05	25.352	1.028	4.4	15	1.52E-07
1.10	11.94	0.12	25.281	1.022	8.5	8	3.81E-08
1.90	30.48	0.30	25.095	1.008	17.2	8	7.61E-08
3.50	64.51	0.65	24.755	0.980	33.3	30	3.81E-08
6.70	114.44	1.14	24.256	0.940	58.3	15	1.90E-08
18.10	176.2	1.76	23.638	0.891	90.9	60	1.27E-08

Interesado: Sergio Castellanos

Proyecto: Tesis

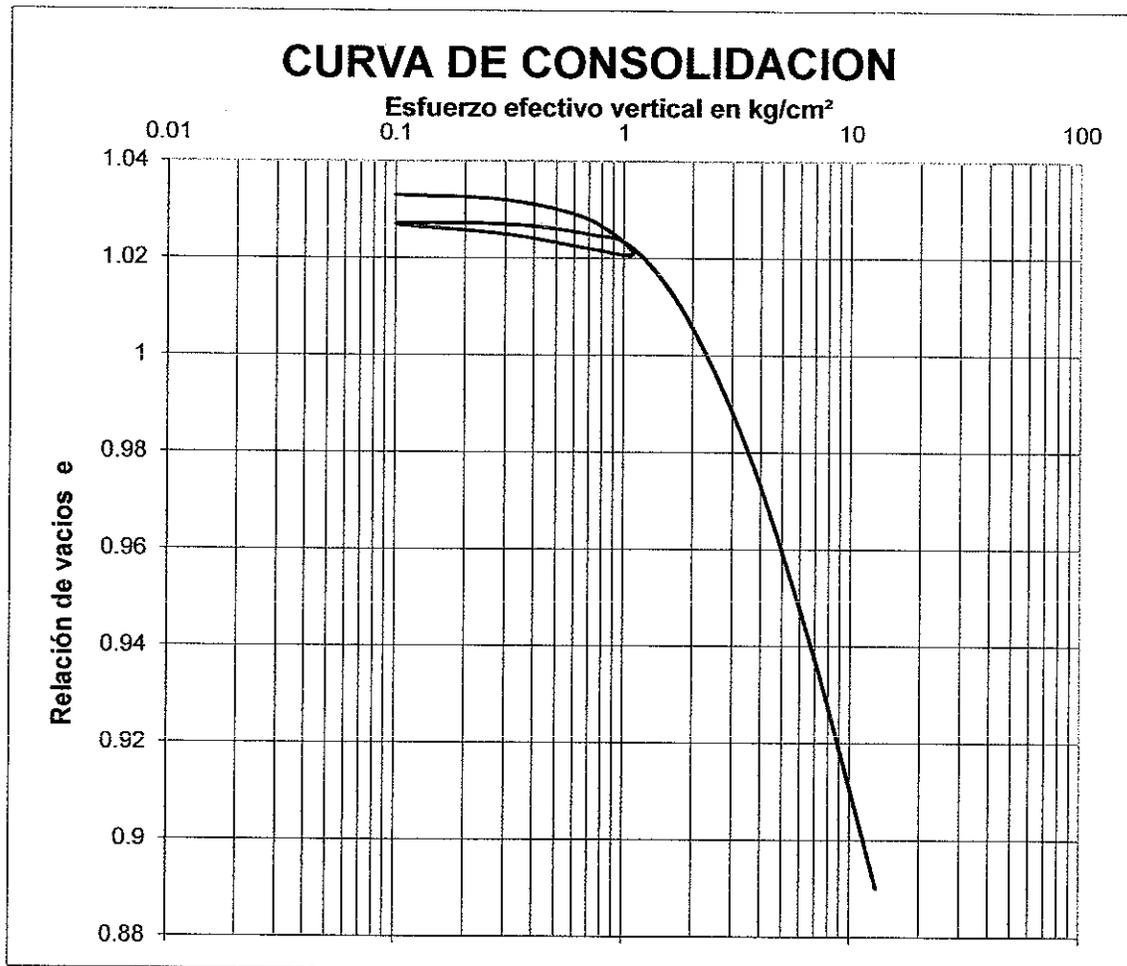
Ubicación: Tesis/USAC

Asunto: CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE SUELOS

Fecha: 14 de mayo de 2015

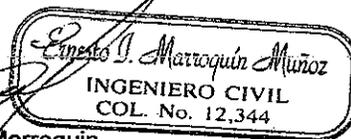
Muestra: 5

NORMA ASTM D-2435



Descripción del Suelo: Arcilla arenosa color beige

Vo.Bo.

Ing. Ernesto Marroquin
Control de Calidad

LABORATORIOS TÉCNICOS

RESULTADOS DE ANÁLISIS

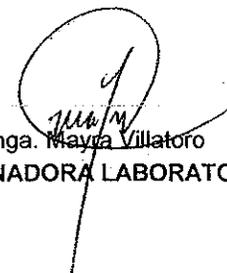
MUESTRA: ARCILLA ROJA M1A
 PRESENTADA POR: Sergio Castellanos
 RESPONSABLE DEL MUESTREO: Sergio Castellanos
 PROCEDENCIA: Dirección de Minería
 LOCALIZACIÓN: El Progreso
 FECHA DE MUESTREO: Desconocida
 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 16-07-14
 FECHA DE ANALISIS: del 21 al 25-07-14
 PRECIO DE ANALISIS: \$ 55.00
 ANALISTA: Hugo Argueta

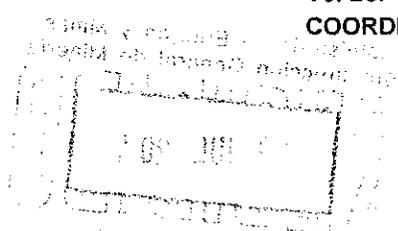
DESCRIPCION	TECNICA	RESULTADOS EN FORMA ELEMENTAL
Silicio, % masa	ICP-OES	27.19
Aluminio, % masa	ICP-OES	6.61
Hierro, % masa	ICP-OES	3.47
Calcio, % masa	ICP-OES	4.98
Magnesio, % masa	ICP-OES	0.84
Bario, % masa	ICP-OES	0.09
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.06
Estroncio, % masa	ICP-OES	0.01

Nota: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.
 ICP-OES = Espectrometría de emisión óptica.


 Ing. Byron Rosales
 ÁREA DE MINERALES




 Vo. Bo. Inga. Mayra Villatoro
 COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



sf

El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.
 Diagonal 17, 29-78 zona 11, (502) 2419-6464, www.mem.gob.gt



LABORATORIOS TÉCNICOS

PAGINA 1 DE (1)

LAB-REP-1281-14

ORDEN No. L-563-14

GUATEMALA, 28-07-14

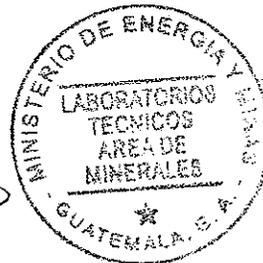
RESULTADOS DE ANÁLISIS

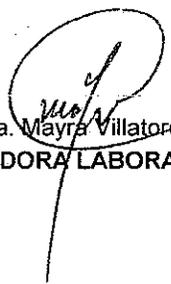
MUESTRA: ARCILLA ROJA M1B
 PRESENTADA POR: Sergio Castellanos
 RESPONSABLE DEL MUESTREO: Sergio Castellanos
 PROCEDENCIA: Dirección de Minería
 LOCALIZACIÓN: El Progreso
 FECHA DE MUESTREO: Desconocida
 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 16-07-14
 FECHA DE ANALISIS: del 21 al 25-07-14
 PRECIO DE ANALISIS: \$ 55.00
 ANALISTA: Hugo Argueta

DESCRIPCION	TECNICA	RESULTADOS EN FORMA ELEMENTAL
Silicio, % masa	ICP-OES	22.10
Aluminio, % masa	ICP-OES	12.03
Hierro, % masa	ICP-OES	6.72
Calcio, % masa	ICP-OES	0.29
Magnesio, % masa	ICP-OES	1.21
Bario, % masa	ICP-OES	0.37
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.02
Estroncio, % masa	ICP-OES	0.02

Nota: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.
 ICP-OES = Espectrometría de emisión óptica.


 Ing. Byron Rosales
 AREA DE MINERALES




 Vo. Bo. Inga. Mayra Villatoro
 COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.
 Diagonal 17, 29-78 zona 11, (502) 2419-6464, www.mem.gob.gt

LABORATORIOS TÉCNICOS

RESULTADOS DE ANÁLISIS

MUESTRA: ARCILLA BLANCA M2B
 PRESENTADA POR: Sergio Castellanos
 RESPONSABLE DEL MUESTREO: Sergio Castellanos
 PROCEDENCIA: Dirección de Minería
 LOCALIZACIÓN: Santa Rosa
 FECHA DE MUESTREO: Desconocida
 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 16-07-14
 FECHA DE ANALISIS: del 21 al 25-07-14
 PRECIO DE ANALISIS: \$ 55.00
 ANALISTA: Hugo Argueta

DESCRIPCION	TECNICA	RESULTADOS EN FORMA ELEMENTAL
Silicio, % masa	ICP-OES	30.93
Aluminio, % masa	ICP-OES	9.56
Hierro, % masa	ICP-OES	1.87
Calcio, % masa	ICP-OES	0.16
Magnesio, % masa	ICP-OES	0.59
Bario, % masa	ICP-OES	0.06
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.003
Estroncio, % masa	ICP-OES	0.004

Nota: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.
 ICP-OES = Espectrometría de emisión óptica.


 Ing. Byron Rosales
 AREA DE MINERALES




 Vo. Bo. Inga. Mayra Villatoro
 COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.
 Diagonal 17, 29-78 zona 11, (502) 2419-6464, www.mem.gob.gt



Gobierno de Guatemala

Ministerio de Energía y Minas

LABORATORIOS TÉCNICOS

PAGINA 1 DE (1)

LAB-REP-1283-14

ORDEN No. L-563-14

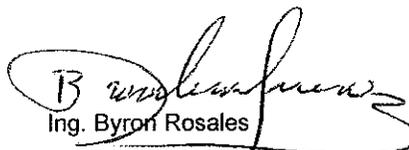
GUATEMALA, 28-07-14

RESULTADOS DE ANÁLISIS

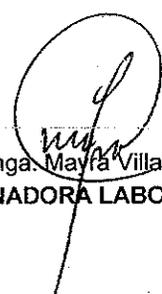
MUESTRA: ARCILLA BLANCA M2A
 PRESENTADA POR: Sergio Castellanos
 RESPONSABLE DEL MUESTREO: Sergio Castellanos
 PROCEDENCIA: Dirección de Minería
 LOCALIZACIÓN: Santa Rosa
 FECHA DE MUESTREO: Desconocida
 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 16-07-14
 FECHA DE ANALISIS: del 21 al 25-07-14
 PRECIO DE ANALISIS: \$ 55.00
 ANALISTA: Hugo Argueta

DESCRIPCION	TECNICA	RESULTADOS EN FORMA ELEMENTAL
Silicio, % masa	ICP-OES	33.60
Aluminio, % masa	ICP-OES	9.12
Hierro, % masa	ICP-OES	1.12
Calcio, % masa	ICP-OES	No detectable
Magnesio, % masa	ICP-OES	0.29
Bario, % masa	ICP-OES	0.05
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.01
Estroncio, % masa	ICP-OES	0.004

Nota: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.
 ICP-OES = Espectrometría de emisión óptica.


 Ing. Byron Rosales
 AREA DE MINERALES




 Vo. Bo. Inga. Mayra Villatoro
 COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.
 Diagonal 17, 29-78 zona 11, (502) 2419-6464, www.mem.gob.gt

www.guatemala.gob.gt

LABORATORIOS TÉCNICOS

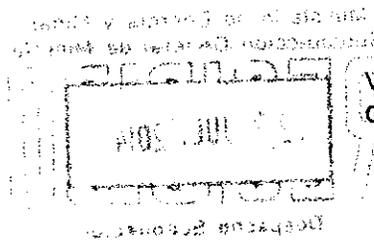
RESULTADOS DE ANÁLISIS

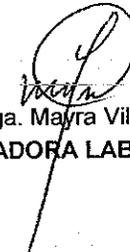
MUESTRA: ARCILLA BEIGE M3B
 PRESENTADA POR: Sergio Castellanos
 RESPONSABLE DEL MUESTREO: Sergio Castellanos
 PROCEDENCIA: Dirección de Minería
 LOCALIZACIÓN: Santa Rosa
 FECHA DE MUESTREO: Desconocida
 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 16-07-14
 FECHA DE ANALISIS: del 21 al 25-07-14
 PRECIO DE ANALISIS: \$ 55.00
 ANALISTA: Hugo Argueta

DESCRIPCION	TECNICA	RESULTADOS EN FORMA ELEMENTAL
Silicio, % masa	ICP-OES	30.72
Aluminio, % masa	ICP-OES	8.95
Hierro, % masa	ICP-OES	2.51
Calcio, % masa	ICP-OES	No detectable
Magnesio, % masa	ICP-OES	0.94
Bario, % masa	ICP-OES	0.08
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.010
Estroncio, % masa	ICP-OES	0.003

Nota: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.
 ICP-OES = Espectrometría de emisión óptica.


 Ing. Byron Rosales
 AREA DE MINERALES




 Vo. Bo. Inga. Mayra Villatoro
 COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



sf

El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.
 Diagonal 17, 29-78 zona 11, (502) 2419-6464, www.mem.gob.gt



Gobierno de Guatemala

Ministerio de Energía y Minas

LABORATORIOS TÉCNICOS

PAGINA 1 DE (1)

LAB-REP-1285-14

ORDEN No. L-563-14

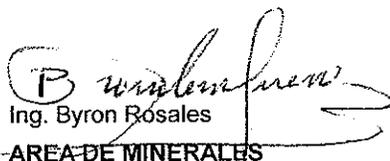
GUATEMALA, 28-07-14

RESULTADOS DE ANÁLISIS

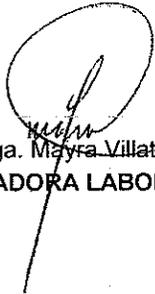
MUESTRA: ARCILLA BEIGE M3A
 PRESENTADA POR: Sergio Castellanos
 RESPONSABLE DEL MUESTREO: Sergio Castellanos
 PROCEDENCIA: Dirección de Minería
 LOCALIZACIÓN: Santa Rosa
 FECHA DE MUESTREO: Desconocida
 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 16-07-14
 FECHA DE ANALISIS: del 21 al 25-07-14
 PRECIO DE ANALISIS: \$ 55.00
 ANALISTA: Hugo Argueta

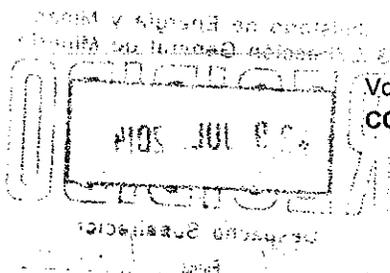
DESCRIPCION	TECNICA	RESULTADOS EN FORMA ELEMENTAL
Silicio, % masa	ICP-OES	30.65
Aluminio, % masa	ICP-OES	9.05
Hierro, % masa	ICP-OES	2.34
Calcio, % masa	ICP-OES	No detectable
Magnesio, % masa	ICP-OES	0.87
Bario, % masa	ICP-OES	0.07
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.020
Estroncio, % masa	ICP-OES	0.005

Nota: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.
 ICP-OES = Espectrometría de emisión óptica.


 Ing. Byron Rosales
 AREA DE MINERALES




 Vo. Bo. Inga. Mayra Villatoro
 COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



sf

El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.
 Diagonal 17, 29-78 zona 11, (502) 2419-6464, www.mem.gob.gt



Gobierno de Guatemala

Ministerio de Energía y Minas

LABORATORIOS TÉCNICOS

PAGINA 1 DE (1)

LAB-REP-1280-14

ORDEN No. L-563-14

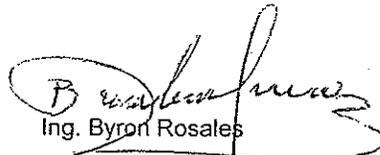
GUATEMALA, 28-07-14

RESULTADOS DE ANÁLISIS

MUESTRA: ARCILLA ROJA M1A
 PRESENTADA POR: Sergio Castellanos
 RESPONSABLE DEL MUESTREO: Sergio Castellanos
 PROCEDENCIA: Dirección de Minería
 LOCALIZACIÓN: El Progreso
 FECHA DE MUESTREO: Desconocida
 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 16-07-14
 FECHA DE ANALISIS: del 21 al 25-07-14
 PRECIO DE ANALISIS: \$ 55.00
 ANALISTA: Hugo Argueta

DESCRIPCION	TECNICA	RESULTADOS EN FORMA ELEMENTAL
Silicio, % masa	ICP-OES	27.19
Aluminio, % masa	ICP-OES	6.61
Hierro, % masa	ICP-OES	3.47
Calcio, % masa	ICP-OES	4.98
Magnesio, % masa	ICP-OES	0.84
Bario, % masa	ICP-OES	0.09
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.06
Estroncio, % masa	ICP-OES	0.01

Nota: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.
 ICP-OES = Espectrometría de emisión óptica.


 Ing. Byron Rosales
 AREA DE MINERALES




 Vo. Bo. Inga. Mayra Villatoro
 COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.

Diagonal 17, 29-78 zona 11, (502) 2419-6464, www.mem.gov.gt

www.guatemala.gov.gt



LABORATORIOS TÉCNICOS

PAGINA 1 DE (1)

LAB-REP-1281-14

ORDEN No. L-563-14

GUATEMALA, 28-07-14

RESULTADOS DE ANÁLISIS

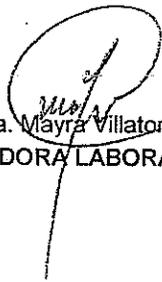
MUESTRA: ARCILLA ROJA M1B
 PRESENTADA POR: Sergio Castellanos
 RESPONSABLE DEL MUESTREO: Sergio Castellanos
 PROCEDENCIA: Dirección de Minería
 LOCALIZACIÓN: El Progreso
 FECHA DE MUESTREO: Desconocida
 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 16-07-14
 FECHA DE ANALISIS: del 21 al 25-07-14
 PRECIO DE ANALISIS: \$ 55.00
 ANALISTA: Hugo Argueta

DESCRIPCION	TECNICA	RESULTADOS EN FORMA ELEMENTAL
Silicio, % masa	ICP-OES	22.10
Aluminio, % masa	ICP-OES	12.03
Hierro, % masa	ICP-OES	6.72
Calcio, % masa	ICP-OES	0.29
Magnesio, % masa	ICP-OES	1.21
Bario, % masa	ICP-OES	0.37
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.02
Estroncio, % masa	ICP-OES	0.02

Nota: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.
 ICP-OES = Espectrometría de emisión óptica.


 Ing. Byron Rosales
 AREA DE MINERALES




 Vo. Bo. Inga. Mayra Villatoro
 COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.

Diagona 17, 29-78 zona 11, (502) 2419-6464, www.mem.gob.gt

www.guatemala.gob.gt



Gobierno de Guatemala

LABORATORIOS TÉCNICOS

PAGINA 1 DE (1)

LAB-REP-1283-14

ORDEN No. L-563-14

GUATEMALA, 28-07-14

RESULTADOS DE ANÁLISIS

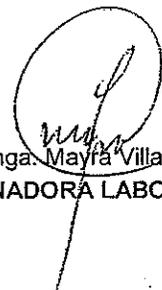
MUESTRA: ARCILLA BLANCA M2A
 PRESENTADA POR: Sergio Castellanos
 RESPONSABLE DEL MUESTREO: Sergio Castellanos
 PROCEDENCIA: Dirección de Minería
 LOCALIZACIÓN: Santa Rosa
 FECHA DE MUESTREO: Desconocida
 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 16-07-14
 FECHA DE ANALISIS: del 21 al 25-07-14
 PRECIO DE ANALISIS: \$ 55.00
 ANALISTA: Hugo Argueta

DESCRIPCION	TECNICA	RESULTADOS EN FORMA ELEMENTAL
Silicio, % masa	ICP-OES	33.60
Aluminio, % masa	ICP-OES	9.12
Hierro, % masa	ICP-OES	1.12
Calcio, % masa	ICP-OES	No detectable
Magnesio, % masa	ICP-OES	0.29
Bario, % masa	ICP-OES	0.05
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.01
Estroncio, % masa	ICP-OES	0.004

Nota: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.
 ICP-OES = Espectrometría de emisión óptica.


 Ing. Byron Rosales
 AREA DE MINERALES




 Vo. Bo. Inga. Mayra Villatoro
 COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



sf

El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.

Diagonal 17, 29-78 zona 11, (502) 2419-6464 www.mem.gob.gt

www.guatemala.gob.gt



LABORATORIOS TÉCNICOS

PAGINA 1 DE (1)

LAB-REP-1282-14

ORDEN No. L-563-14

GUATEMALA, 28-07-14

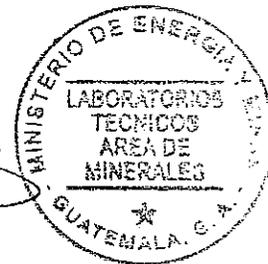
RESULTADOS DE ANÁLISIS

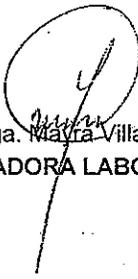
MUESTRA: ARCILLA BLANCA M2B
 PRESENTADA POR: Sergio Castellanos
 RESPONSABLE DEL MUESTREO: Sergio Castellanos
 PROCEDENCIA: Dirección de Minería
 LOCALIZACIÓN: Santa Rosa
 FECHA DE MUESTREO: Desconocida
 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 16-07-14
 FECHA DE ANALISIS: del 21 al 25-07-14
 PRECIO DE ANALISIS: \$ 55.00
 ANALISTA: Hugo Argueta

DESCRIPCION	TECNICA	RESULTADOS EN FORMA ELEMENTAL
Silicio, % masa	ICP-OES	30.93
Aluminio, % masa	ICP-OES	9.56
Hierro, % masa	ICP-OES	1.87
Calcio, % masa	ICP-OES	0.16
Magnesio, % masa	ICP-OES	0.59
Bario, % masa	ICP-OES	0.06
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.003
Estroncio, % masa	ICP-OES	0.004

Nota: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.
 ICP-OES = Espectrometría de emisión óptica.


 Ing. Byron Rosales
 AREA DE MINERALES




 Vo. Bo. Inga. Mayra Villatoro
 COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



sf

El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.
 Diagonal 47, 29-78 zona 11, (502) 2419-6464, www.mem.gob.gt



Gobierno de Guatemala

LABORATORIOS TÉCNICOS

PAGINA 1 DE (1)

LAB-REP-1285-14

ORDEN No. L-563-14

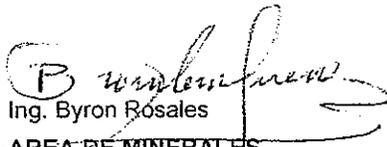
GUATEMALA, 28-07-14

RESULTADOS DE ANÁLISIS

MUESTRA: ARCILLA BEIGE M3A
 PRESENTADA POR: Sergio Castellanos
 RESPONSABLE DEL MUESTREO: Sergio Castellanos
 PROCEDENCIA: Dirección de Minería
 LOCALIZACIÓN: Santa Rosa
 FECHA DE MUESTREO: Desconocida
 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 16-07-14
 FECHA DE ANALISIS: del 21 al 25-07-14
 PRECIO DE ANALISIS: \$ 55.00
 ANALISTA: Hugo Argueta

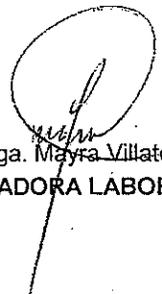
DESCRIPCION	TECNICA	RESULTADOS EN FORMA ELEMENTAL
Silicio, % masa	ICP-OES	30.65
Aluminio, % masa	ICP-OES	9.05
Hierro, % masa	ICP-OES	2.34
Calcio, % masa	ICP-OES	No detectable
Magnesio, % masa	ICP-OES	0.87
Bario, % masa	ICP-OES	0.07
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.020
Estroncio, % masa	ICP-OES	0.005

Nota: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.
 ICP-OES = Espectrometría de emisión óptica.


 Ing. Byron Rosales

AREA DE MINERALES




 Vo. Bo. Inga. Mayra Villatoro

COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



sf

El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.
 Diagonal 17, 29-78 zona 11. (502) 2419-6464, www.mem.gob.gt



LABORATORIOS TÉCNICOS

PAGINA 1 DE (1)

LAB-REP-1284-14

ORDEN No. L-563-14

GUATEMALA, 28-07-14

RESULTADOS DE ANÁLISIS

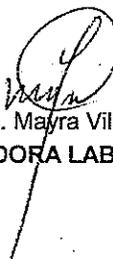
MUESTRA: ARCILLA BEIGE M3B
 PRESENTADA POR: Sergio Castellanos
 RESPONSABLE DEL MUESTREO: Sergio Castellanos
 PROCEDENCIA: Dirección de Minería
 LOCALIZACIÓN: Santa Rosa
 FECHA DE MUESTREO: Desconocida
 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 16-07-14
 FECHA DE ANALISIS: del 21 al 25-07-14
 PRECIO DE ANALISIS: \$ 55.00
 ANALISTA: Hugo Argueta

DESCRIPCION	TECNICA	RESULTADOS EN FORMA ELEMENTAL
Silicio, % masa	ICP-OES	30.72
Aluminio, % masa	ICP-OES	8.95
Hierro, % masa	ICP-OES	2.51
Calcio, % masa	ICP-OES	No detectable
Magnesio, % masa	ICP-OES	0.94
Bario, % masa	ICP-OES	0.08
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.010
Estroncio, % masa	ICP-OES	0.003

Nota: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.
 ICP-OES = Espectrometría de emisión óptica.


 Ing. Byron Rosales
 AREA DE MINERALES




 Vo. Bo. Inga. Mayra Villatoro
 COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



sf

El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.

Diagonal 17, 29-78 zona 11, (502) 2419-6464, www.mem.gob.gt

www.guatemala.gov.gt

Tabla de Resultados de los ensayos Químicos y Mecánicos

Descripción de ensayos Químicos y Mecánicos de la investigación	Identificación de las muestras				
	M1 (El Progreso)	M2a (Santa Rosa)	M2b (Santa Rosa)	M3a (Santa Rosa / Jalapa)	M3b (Santa Rosa / Jalapa)
Silicio, % masa	22.1	33.6	30.93	30.65	30.72
Aluminio, % masa	12.03	9.12	9.56	9.05	8.95
Bario, % masa	0.37	0.05	0.06	0.07	0.08
Calcio, % masa	0.29	0	0.16	0	0
Hierro, % masa	6.72	1.12	1.87	2.34	2.51
Magnesio, % masa	1.21	0.29	0.59	0.87	0.94
Manganeso, % masa	0.02	0.01	0.003	0.02	0.01
Estroncio, mg/Kg	0.02	0.004	0.004	0.005	0.003
Grupo de arcilla al que pertenece	Caolín	Caolín	Caolín	Montmorillonita	Montmorillonita
Tipo de arcilla	Caolinita	Halloysita	Halloysita	Montmorillonita	Montmorillonita
Ocurrencia	Suelos, Rocas encajantes	Suelos	Suelos	Suelos, bentonita	Suelos, bentonita
Origen	Meteorización	Meteorización	Meteorización	Hidrotermal	Hidrotermal
Periodo o Era geológica	Paleozoica	Terciaria	Terciaria	Cuaternaria	Cuaternaria
Formación geológica	Unidad Pzm	Unidad I	Unidad I	Unidad Qp	Unidad Qp
Clasificación granulométrica S.C.U.:	CL	CL	CL	CH	CH
Límite líquido %:	40.7	48.3	43.1	61.1	50.2
Índice de plasticidad %:	19	29.27	23.6	37.2	30.2
Ángulo de fricción interna (corte directo):	10.80°	11.90°	13.00°	8.90°	9.60°
Cohesión (corte directo) Ton/m ² :	0.9	1.3	1.3	1.1	1.6
Gravedad específica:	2.5	2.54	2.64	2.54	2.6
Coefficiente de expansión:	0.01	0.04	0.015	0.015	0.007
Coefficiente de compresión:	0.26	0.31	0.31	0.29	0.27

Fuente: elaboración propia